

Experimentelle Untersuchung an einem offenen Absorptionssystem zur Entfeuchtung in Kreuzstromfahrweise

Dem Fachbereich 12 – Maschinenwesen
Energie-, Maschinen- und Verfahrenstechnik
an der Universität – GHS Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Thomas von Oelsen
aus Berlin

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr. -Ing. A. Fischer
Gutachter:	Prof. Dr. -Ing. Fritz Steimle
	Prof. Dr. -Ing. Ingo Romey

Tag der mündlichen Prüfung: 24.09.2001

Potsdam 2001

I. Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand auf Anregung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Fritz Steimle während meiner Tätigkeit am Institut für Angewandte Thermodynamik und Klimatechnik der Universität GHS in Essen.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. -Ing. Fritz Steimle sei für die Anregungen zu dieser Arbeit, für deren schnelle und gründliche Durchsicht, sowie für die Zeit der Diskussionen und die wertvollen Anmerkungen und Hinweise gedankt. Herrn Prof. Dr. -Ing. Ingo Romey danke ich als Mitberichter für die zügige Erstellung des Zweitgutachtens. Bei Herrn Prof. Dr. -Ing. A. Fischer möchte ich mich für den Vorsitz der mündlichen Prüfung bedanken.

Durch die kollegiale hilfsbereite und freundliche Atmosphäre innerhalb des Institutes wurde diese Arbeit eine Bereicherung über die wissenschaftliche Arbeit hinaus für mein bisheriges Leben. Namentlich sei aus dem Institut Herrn Andreas Gernemann zu danken, dessen freundschaftliche Hilfe über seine Diplomarbeit -die Erstellung und Inbetriebnahme des Versuchsstandes- hinaus ging.

Herrn Dr. -Ing. Holger Krühne gebührt besondere Dank für seine konstruktive Kritik und ständige Diskussionsbereitschaft.

Meiner Frau Simone und meinen Töchtern Juli und Malou sei für die Entbehrung und Zeit der Abwesenheit vor allem in der letzten Zeit gedankt.

Last not Least bedanke ich mich bei meinen Eltern für die mir freigestellte Zeit, Motivation, sowie die finanzielle Unterstützung. Da diese Arbeit ohne Sie in so konzentrierter Form sicher nicht möglich gewesen wäre, möchte ich aus diesem Grund die vorliegende Arbeit meinen Eltern widmen.

II. Kurzfassung

Die Herstellung und Aufrechterhaltung von behaglichen Raumluftkonditionen ist im heutigen Wissenszeitalter für die Dienstleistungsunternehmen ein wichtiger Produktivitätsfaktor geworden. Um diese Raumluftkonditionen energie-wirtschaftlich optimal zu erreichen, ist es notwendig, die Luftbehandlungs-funktionen so eigenständig wie möglich zu betrachten. Die Trennung der thermodynamischen Prozesse Entfeuchten und Kühlen ist energiewirtschaftlich relevant, da die Bereitstellung der Kälte und damit der Energieaufwand einer herkömmlichen raumluftechnischen Anlage massgeblich durch die geforderte Entfeuchtungsleistung bestimmt wird. Eine energetisch rationellere Entfeuchtung ist durch den Einsatz von hygroskopischen Salzen möglich, so dass zu diesem Zweck auf die klassische Kälteerzeugung verzichtet werden könnte.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Integration einer für die Klimatechnik ausreichenden sorptiven Entfeuchtung in eine raumluftechnische Anlage. Hierfür wird zunächst in der Voruntersuchung die Grundlage der möglichen messtechnischen Regelbarkeit und die konstruktive Umsetzung einer mit wässrigen Salzlösung arbeitenden Entfeuchtungsanlage erarbeitet. In der Hauptuntersuchung werden zwei Entfeuchter mit unterschiedlichen Oberflächen ausgestattet. Die möglichen Entfeuchtungsleistungen werden in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit, der Anfangskonzentration der Salzlösung und der Massenstromverhältnisse gemessen. Durch umfangreiche Temperatur- und Konzentrationsmessungen der wässrigen Salzlösung wird die Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit für die Entfeuchtung getestet. Die entstehenden Entfeuchtungsbreiten und Druckverluste dieses offenen Absorptionssystems werden mit anderen entfeuchtenden Komponenten verglichen. Mithilfe der Messergebnisse werden die Stoffübergangs- und Wärmedurchgangskoeffizienten berechnet, sowie die Aufteilung der sensiblen zur umgewandelten latenten Wärme dargestellt. Abschließend werden anhand der gefundenen Ergebnisse konstruktive Optimierungen aufgezeigt.

III. Inhaltsverzeichnis

I. VORWORT	I
II. KURZFASSUNG	II
III. INHALTSVERZEICHNIS	III
IV. SYMBOLE, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	VII
V. PROLOG	X
1 EINLEITUNG	1
2 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG	3
3 GRUNDLAGEN DER FEUCHTEN LUFT	5
4 THERMISCHE BEHAGLICHKEIT	8
4.1 Temperatur	10
4.1.1 Operative Raumtemperatur	10
4.1.2 Temperaturgradient	12
4.2 Luftgeschwindigkeit	13
4.3 Luftfeuchte	14
5 DIE WÄRMEABGABE DES MENSCHEN	15
6 NOTWENDIGKEIT DER LUFTENTFEUCHTUNG	21
6.1 Raumlufitentfeuchtung	21
6.2 Prozessluftentfeuchtung	22
6.3 Meteorologische Daten	24

7	VERFAHREN DER LUFTENTFEUCHTUNG	27
7.1	Taupunktunterschreitung	27
7.2	Hygroskopische Effekte	29
7.2.1	Sorptionstechnik	29
7.2.2	Sorbentien	34
8	ERGEBNISSE DER VORUNTERSUCHUNG	35
8.1	Verteilung des Sorbens	35
8.1.1	Wissensstand über die Verteilung des Sorbens	35
8.1.2	Bisektionale Verteilung	36
8.1.2.1	Konstruktive Fertigung	39
8.1.2.2	Durchflußverteilung	40
8.1.2.3	Durchflussmenge	41
8.2	Oberfläche des Absorbers	43
8.3	Konzentrationsmessung der Sole	52
8.3.1	Konzentrationsmessung über die Dichte	53
8.3.2	Konzentrationsmessung über die elektrische Leitfähigkeit	56
8.3.2.1	Versuchsdurchführung	56
9	VERSUCHSAUFBAU	59
9.1	Anlagenschema	59
9.2	Luftführung	60
9.3	Solestrom	60
9.4	Kühlkreislauf (Wasser)	60
9.5	Absorberaufbau	60
9.6	Messtechnik	65

10	MESSREIHEN	67
10.1	Übersicht der am Absorber durchgeführten Messreihen	67
10.2	Konstante Versuchsparameter	68
10.3	Variable Versuchsparameter	69
11	AUSWERTUNG UND DARSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE	70
11.1	Konzentrationsverteilung auf der Platte	70
11.1.1	Konzentrationsverlauf auf der Absorberfläche mit einer Anfangskonzentration der Sole von 60 %	71
11.1.2	Konzentrationsverlauf auf der Absorberfläche mit einer Anfangskonzentration der Sole von 52 %	73
11.1.3	Vergleich der Konzentrationsverläufe auf der Wabenvliesoberfläche und der Polykarbonatoberfläche mit einer Anfangskonzentrationen der Sole von 52 % und 60 %	74
11.2	Temperaturverteilung auf der Platte	77
11.3	Druckverluste	81
11.4	Entfeuchtungsbreiten	83
11.4.1	Entfeuchtungsgrad	89
11.4.1.1	Entfeuchtungsgrad in Abhängigkeit des Massenstromverhältnisses	91
11.4.1.2	Entfeuchtungsgrad in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit	94
11.5	Wärme- und Stoffübergang	96
11.5.1	Stoffübergangskoeffizient	96
11.5.2	Wärmedurchgangskoeffizient $k_{L, kw}$	97
11.5.3	Aufteilung der sensiblen zur umgewandelten latenten Wärme	103
12	FOLGERUNGEN FÜR DIE KONSTRUKTION	106
13	ZUSAMMENFASSUNG	108

14	AUSBLICK	112
15	EPILOG	113
16	ANHANG	114
16.1	Technische Zeichnungen	114
Verteilung		114
Absorber		115
16.2	Berechnungen	120
16.2.1	Berechnungen der Konstanten des Biegeschwingers	120
16.2.2	Dichte	121
16.2.3	Spezifische Wärmekapazität von Klimat	122
17	VERZEICHNISSE	124
17.1	Abbildungsverzeichnis	124
17.2	Tabellenverzeichnis	130
17.3	Literaturverzeichnis	132

IV. Symbole, Indizes und Abkürzungen

Symbole

A	Querschnittsfläche, Fläche	[m ²]
A	Apparatekonstante zur Dichtebestimmung	[m ³ s ² /kg]
a	Korrekturfaktor für Taupunkt	[-]
B	Apparatekonstante zur Dichtebestimmung	[s ²]
b _g	Benetzungsgrad der Absorberfläche	[%]
c	Federkonstante	[N/m]
c	Berechnungskonstanten	[-]
c _p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	[J/kgK]
c _e	spezifische Wärmekapazität des Eises	[J/kgK]
f	Eigenfrequenz	[1/s]
G	elektrischer Leitwert	[S]
h	spezifische Enthalpie	[J/kgK]
K	Konzentration	[%]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m ² K]
L	Länge	[m]
Le	Lewis Kennzahl	[-]
M	Masse	[kg]
m	Steigung der Geraden	[-]
\dot{M}	Massenstrom	[kg/s]
p _D	Partialdruck von Wasserdampf	[Pa]
\dot{Q}	Wärmestrom	[kJ/s]
q	spezifische Energie	[kWh/(m ³ /h)a]
R	Gaskonstante	[J/kgK]
r ₀	spezifische Verdampfungsenthalpie bei 0 °C	[J/kg]
r _e	spezifische Erstarrungswärme	[J/kg]
S	Schichtdicke	[m]
T	absolute Temperatur	[K]
T	Schwingungsdauer	[s]
t	Temperatur	[°C]
V	Volumen	[m ³]

w	Korrekturfaktor für Taupunkt	[-]
w	Geschwindigkeit	[m/s]
x	absoluter Wassergehalt	[kg _w /kg _{tr L}]
y	Konzentration	[1/100]
Z _t	jährliche Kühlstunden	[h/a]
Z _x	jährliche Entfeuchtungsstunden	[h/a]

Indizes

au	Außen, Austritt
D	Dampf
ein	Eintritt, Anfangskonzentration
empf	empfunden
F	Fläche
F _b	benetzte Fläche
ges	gesamt
g	Grad
j	Zählvariable, Anzahl der einzelnen Schichten
k	Einstrahlzahl der Fläche
Kw	Kühlwasser
L	Luft
lat	latent
n	Anzahl der einzelnen Flächen
Pro	Probe
PC	wasserspreitend beschichtete Polykarbonatoberfläche
PP	Polypropylen mit Wabenvliesoberfläche
s	Sättigungszustand
S	Strahlung, Schichtdicke
sens	sensibel
Schw	Schwinger
Sole	Sole hier Klimat
Sorbens	Sorbens hier Klimat
t	temperaturabhängig
Tau	Taupunkt

Ü	Überströmung
V	Wabenvliesoberfläche
W	Wasser
zu	Zuluft
tr L	trockene Luft

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]
β	Stoffübergangskoeffizient	[m/s]
Δ	Differenz	[-]
ε	Entfeuchtungsgrad	[-]
φ_k	Einstrahlzahl der Fläche	[-]
φ	relative Luftfeuchte	[%]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
Π	Massenstromverhältnis	[-]
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	[K]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
χ	elektrischer Leitwert	[S/m]

Abkürzungen

bzw.	beziehungsweise
u.a.	unter anderem, und anderen
vgl.	vergleiche
z. T.	zum Teil

V. Prolog

Geheimnisse

„Das Schönste, was wir erleben können, ist das Geheimnisvolle. Es ist das Grundgefühl, das an der Wiege von wahrer Kunst und Wissenschaft steht. Wer es nicht kennt und sich nicht mehr wundern, nicht mehr staunen kann, der ist sozusagen tot und sein Auge erloschen.“ [1]

Albert Einstein

1 Einleitung

Die Nutzung der Einsparpotentiale im Bereich der Klimatechnik durch die verfahrenstechnische Optimierung der Anlagen, führte zu der Entwicklung, die Luftbehandlungsfunktionen wie Lüften, Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten so eigenständig wie möglich zu betrachten. Durch diese selbständige Betrachtungsweise wird es möglich, die eingesetzte Energie den Luftbehandlungsfunktionen zuzuordnen und gezielt für die notwendige Herstellung und Aufrechterhaltung eines behaglichen Raumklimas einzusetzen.

Beispielhaft lassen sich nennen:

- Die Trennung von Stofflast und Energielast wurde durch die Flächenkühlung möglich. Als geeignete Ergänzung hat sich hier die Kombination von Quelllüftung [2] [3] und Deckenkühlung [4] herausgestellt.
- Beim Heizen und Kühlen wird die Speicherfähigkeit eines Gebäudes durch die Betonkernaktivierung [5] ausgenutzt.

Die Trennung von Entfeuchten und Kühlen ist ein weiterer Schritt in der getrennten Betrachtungsweise der thermodynamischen Prozesse im Bereich der Klimatechnik, da die Bereitstellung der Kälte für eine raumluftechnische Anlage maßgeblich durch deren geforderte Entfeuchtungsleistung bestimmt wird. Üblicherweise erfolgt die Entfeuchtung der Zuluft durch die Unterschreitung des Taupunktes an einem Wärmeaustauscher mit Oberflächentemperaturen von etwa 10°C. Hierfür werden Vorlauftemperaturen des Kälteträgers von ungefähr 6 °C benötigt. Um behagliche Zulufttemperaturen zu erreichen, muss die zunächst unter Energieeinsatz abgekühlte Luft nacherwärmt werden. Diese Nacherwärmung ist durch die Entfeuchtung durch Taupunktunterschreitung thermodynamisch notwendig, jedoch energetisch unwirtschaftlich. Eine energetisch rationellere Entfeuchtung ist durch den Einsatz von hygroskopischen Salzen möglich, die den Feuchtegehalt der Luft unabhängig von der Taupunkttemperatur direkt senken können. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass zur Entfeuchtung auf den Einsatz klassischer Kältetechnik verzichtet werden kann. Durch die niedrigen Regenerationstemperaturen kann auf die im Sommer ungenutzte Fernwärme, Abwärme aus technologischen Prozessen oder auf Solarenergie zurückgegriffen werden [6]. Damit wird nicht nur eine Senkung der

Betriebskosten erzielt, sondern durch den verringerten Primärenergieaufwand zugleich ein Beitrag geleistet, die klimarelevanten Emissionen zu senken.

Die genannten hygroskopischen Salze werden in kristalliner Form bereits erfolgreich in den als Rotationswärmeaustauschern bekannten Wärmerückgewinnungsanlagen eingesetzt [7]. Diese Wärmerückgewinnung besteht aus einem zwischen dem Zuluft- und Abluftkanal rotierenden, von der Luft durchströmten hygroskopisch beschichteten Rad aus Metall. Um bei diesen mit kristallinen Salzen beschichteten Rädern eine kontinuierliche Luftentfeuchtung aufrechtzuerhalten, wird die Abluft des Raumes zur Regeneration des Rotationswärmeaustauschers eingesetzt. Die Abluft muss jedoch für die Entfeuchtung des Wärmeaustauschers auf die notwendige Regenerationstemperatur nachgeheizt werden, was sich energetisch ungünstig auswirkt.

Ein weiterer Schritt in Richtung des sparsamen und sinnvollen thermodynamischen Energieeinsatzes wird mit der zeitlichen und örtlichen Trennung von Entfeuchtung und Regeneration durch den Einsatz von wässriger Salzlösungen möglich [8]. Der Vorteil gegenüber den mit festen Salzen betriebenen Entfeuchtungsanlagen besteht darin, dass die Feuchtigkeit aufnehmende wässrige Salzlösung in einer separaten Anlage durch die Zufuhr von Niedertemperaturwärme, z. B. in Form von Solarenergie, regeneriert und anschließend dem Entfeuchtungssystem erneut zugeführt werden kann.

Ein weiterer Vorteil bei den mit wässriger Salzlösungen arbeitenden Anlagen besteht darin, dass die bei beiden Entfeuchtungssystemen frei werdende Kondensationswärme der feuchten Luft durch eine prozessinterne Kühlung abgeführt werden kann und damit im Vergleich zu den mit festen Salzen arbeitenden Systemen größere Entfeuchtungsbreiten erzielt werden können.

Einen Beitrag zur Weiterentwicklung dieser mit wässriger Salzlösungen betriebenen Entfeuchtungsanlagen zu leisten, ist Gegenstand und Motivation dieser Arbeit.

2 Motivation und Zielsetzung

Die Motivation zur Weiterentwicklung von Luft entfeuchtenden Systemen mit Hilfe von wässriger Salzlösung, ist an der Universität Essen entstanden. Im Rahmen der Untersuchung: „Sorptive Entfeuchtung und Temperaturabsenkung bei der Klimatisierung“ [38] wurde ein sorptives Entfeuchtungssystem von Röben [8] untersucht. Die zu entfeuchtende Luft wurde in diesem System entgegen der Strömungsrichtung des flüssigen Salzes geführt. Diese Art der Luftführung ist in Klimaanlage nicht so einfach integrierbar bzw. nachrüstbar wie eine Strömungsrichtung, in der sich Solestrom und die Luft kreuzen (Kreuzstromfahrweise). Röben stellte in seiner Arbeit u.a. [8] fest, dass eine Verbesserung der Verteilung des Salzes auf der an der Entfeuchtung beteiligten Oberfläche wünschenswert und weitere Entwicklungsarbeit notwendig ist.

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, die von Röben nachfolgend genannten Probleme aufzugreifen und weiterführende Forschungsarbeit auf dem Gebiet der sorptiven Entfeuchtung zu leisten, um dieses ökologisch und ökonomisch sinnvolle Entfeuchtungssystem zur Marktreife zu bringen.

Um diesen Entwicklungsschub zu erzielen, muss für die nachfolgenden Zusammenhänge ein Ergebnis erarbeitet werden:

- Die Entwicklung eines Entfeuchtungsapparates in Kreuzstromfahrweise.
- Die Entwicklung einer gleichmäßigen Verteilung, die, möglicherweise zum parallelen Betrieb mehrerer entfeuchtender Oberflächen geeignet ist.
- Die Verbesserung der Benetzungsfähigkeit der sonst wasserabstoßenden Kunststoffoberflächen ist anzustreben.
- Es müssen Aussagen über die Temperaturfelder und Konzentrationsänderungen auf der aktiven Austauschfläche gefunden werden, um eine optimierte konstruktive Umsetzung des mit einer wässrigen Salzlösung arbeitenden Entfeuchters hinsichtlich des Längen- und Breitenverhältnisses zu gewährleisten.
- Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten

Eine Klärung dieser genannten Probleme führt zur weiteren Entwicklung der Nachrüstmöglichkeit für bestehende raumlufttechnische Anlagen und zur Entwicklung einer neuen Komponente für den Bereich der Entfeuchtung.

In dem nächsten Kapitel: 3 „Grundlagen der feuchten Luft“ werden zunächst die elementaren Gesetzmäßigkeiten der feuchten Luft erläutert, mit deren Verfahren der Entfeuchtung sich diese Arbeit im Wesentlichen beschäftigt.

3 Grundlagen der feuchten Luft

Feuchte Luft ist ein Gemisch aus trockener Luft und Wasser. Bei den in der Raumluftechnik üblichen Temperatur- und Druckbereichen lässt sich das Gemisch aus trockener Luft und Wasserdampf mit ausreichender Genauigkeit als ideales Gasgemisch betrachten [9]. Der Wassergehalt der Luft x [$\text{kg}_W/\text{kg}_{trL}$] gibt das Verhältnis der Wassermenge M_W [kg] zur Masse der trockenen Luft M_L [kg] wieder. Die Wassermenge in Form von Wasserdampf wird durch folgende in der Klimatechnik üblichen Darstellungen beschrieben:

- Als absolute Feuchte x [$\text{kg}_W/\text{kg}_{trL}$]

$$x = \frac{M_W}{M_L}$$

Gleichung 1 [13]

Mit: x = absoluter Feuchtigkeitsgehalt [$\text{kg}_W/\text{kg}_{trL}$]

M_W = Masse des Wassers [kg]

M_L = Masse der trockenen Luft [kg]

Die absolute Feuchte x gibt an, wieviel Kilogramm Wasser in einem Kilogramm trockener Luft enthalten ist.

- Als relative Feuchte φ [%]

$$\varphi = \frac{p_D}{p_{s(t)}} \times 100$$

Gleichung 2 [13]

Mit: φ = relative Luftfeuchtigkeit [%]

p_D = Wasserdampfteildruck [Pa]

$p_{s(t)}$ = Sättigungsdruck des Wasserdampfes [Pa], temperaturabhängig

Die relative Feuchte φ gibt das Verhältnis des tatsächlich vorhandenen Wasserdampfteildruckes p_D zu dem bei dieser Temperatur maximal möglichen Wasserdampfteildruckes $p_{s(t)}$ wieder. Der Sättigungsdruck des Wasserdampfes ist von der Temperatur abhängig. Sinkt die Temperatur bis zur Sättigungstemperatur, steigt demzufolge die relative Feuchte bis auf maximal 100 % an. Sinkt die Temperatur weiter unter die Sättigungstemperatur, fällt der Wasserdampf in Form von

Wassertröpfchen als feiner Nebel bzw. Niederschlag aus, der so genannte Taupunkt wird unterschritten.

- Als Teildruck p_D [Pa] des Wasserdampfes in der Luft

Der Wasserdampfdruck p_D [Pa] wird durch die Zustandsgleichung idealer Gase beschrieben:

$$p_D = \frac{m_D \times R_D \times T}{V}$$

Gleichung 3 [13]

Mit: p_D = Wasserdampfdruck [Pa]

m_D = Masse des Dampfes, [kg]

R_D = Gaskonstante des Wasserdampfes, $R_D = 461,5$ [J/kg K]

T = absolute Temperatur der feuchten Luft, [K]

V = Volumen des Gasgemisches aus trockener Luft und Wasserdampf, [m³]

Enthalpie der feuchten Luft

Die feuchte Luft kann in drei Erscheinungsformen vorkommen. Die Berechnung der Zustandsänderungen der feuchten Luft erfolgt durch nachfolgende Gleichungen. Der Wärmeinhalt der Luft (Enthalpie) setzt sich aus dem Wärmeinhalt der trockenen Luft und dem Wärmeinhalt des Wasserdampfes zusammen.

1. trockene Luft und ungesättigter Wasserdampf:

$$h = c_{pL} \cdot t + x(r_0 + c_{pW} \cdot t)$$

Gleichung 4 [13]

Mit: h = spezifische Enthalpie [J/kg]

c_{pL} = spezifische Wärmekapazität der Luft [J/kg K]

c_{pW} = spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfes [J/kg K]

t = Temperatur [°C]

x = absoluter Feuchtigkeitsgehalt [kg_W/kg_{tr L}]

r_0 = spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers bei 0°C [J/kg]

2. trockene Luft, gesättigter Wasserdampf und Wasser:

$$h = c_{pL} \cdot t + x_s (r_0 + c_{pW} \cdot t) + (x - x_s) \cdot c_W \cdot t$$

Gleichung 5 [13]

- Mit: h = spezifische Enthalpie [J/kg]
 c_{pL} = spezifische Wärmekapazität der Luft [J/kg K]
 c_{pW} = spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfs [J/kg K]
 c_W = spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit [J/kg K]
 t = Temperatur [°C]
 x = absoluter Feuchtigkeitsgehalt [kg_W/kg_{tr L}]
 x_s = gesättigter Feuchtigkeitsgehalt [kg_W/kg_{tr L}]
 r_0 = spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers bei 0°C [J/kg]

3. trockene Luft, gesättigter Wasserdampf und Eis:

$$h = c_{pL} \cdot t + x_s (r_0 + c_{pW} \cdot t) + (x - x_s) \cdot c_e \cdot t - r_e$$

Gleichung 6 [13]

- Mit: h = spezifische Enthalpie [J/kg]
 c_{pL} = spezifische Wärmekapazität der Luft [J/kg K]
 c_{pW} = spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfs [J/kg K]
 c_e = spezifische Wärmekapazität des Eises [J/kg K]
 t = Temperatur [°C]
 x = absoluter Feuchtigkeitsgehalt [kg_W/kg_{tr L}]
 x_s = gesättigter Feuchtigkeitsgehalt [kg_W/kg_{tr L}]
 r_0 = spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers bei 0°C [J/kg]
 r_e = spezifische Erstarrungswärme des Wassers [J/kg]

Im nächsten Kapitel wird die Grundlage zum Verständnis der thermischen Behaglichkeit eines Menschen und die damit verbundene Notwendigkeit der Luftentfeuchtung erarbeitet.

4 Thermische Behaglichkeit

Um die Notwendigkeit der Entfeuchtung der Luft zu begreifen, ist es sinnvoll, die Gesetzmäßigkeiten des thermischen Behaglichkeitsempfindens eines Menschen zu verstehen.

Thermische Behaglichkeit empfindet ein Mensch, wenn er die Einflußgrößen:

- Lufttemperatur
- Temperatur der Raumumschließungsflächen
- Luftfeuchte
- Luftbewegung

und deren zugehörigen Vorgänge wie Strahlung, Konvektion und Leitung in seiner Umgebung als optimal empfindet und weder wärmere noch kältere und weder noch trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht [nach 10].

Ausgehend von den physikalischen Gegebenheiten, beschränkt sich die thermische Behaglichkeit auf sechs Haupteinflussfaktoren, die bei der Herstellung bzw. Aufrechterhaltung eines behaglichen Raumklimas aufeinander abgestimmt werden müssen:

- Aktivitätsgrad des Menschen
- Bekleidung des Menschen
- Lufttemperatur
- Temperatur der Raumumschließungsflächen
- Luftgeschwindigkeit
- Luftfeuchte

Der Aktivitätsgrad und die Art der Bekleidung des Menschen sind bei den Raumnutzern individuell verschieden und durch die Raumklimotechnik nicht zu beeinflussen. Damit bleiben Lufttemperatur, Temperatur der Raumumschließungsflächen, Luftgeschwindigkeit und die Luftfeuchte die Einflussgrößen, die auf den Wärmehaushalt und damit auf das Behaglichkeitsempfinden des Menschen in komplexer Weise einwirken und durch die Klimatechnik zu lenken sind.

Wegen des subjektiven Behaglichkeitsempfindens kann nur ein Bereich angegeben werden, dessen Begrenzung (siehe Abbildung 1) sich aus den –Luftgeschwindigkeit ausgenommen– genannten Größen zusammensetzt und in dem sich der Mensch mit seiner Umgebung im thermischen Gleichgewicht befindet, das heißt, sich am wohlsten fühlt.

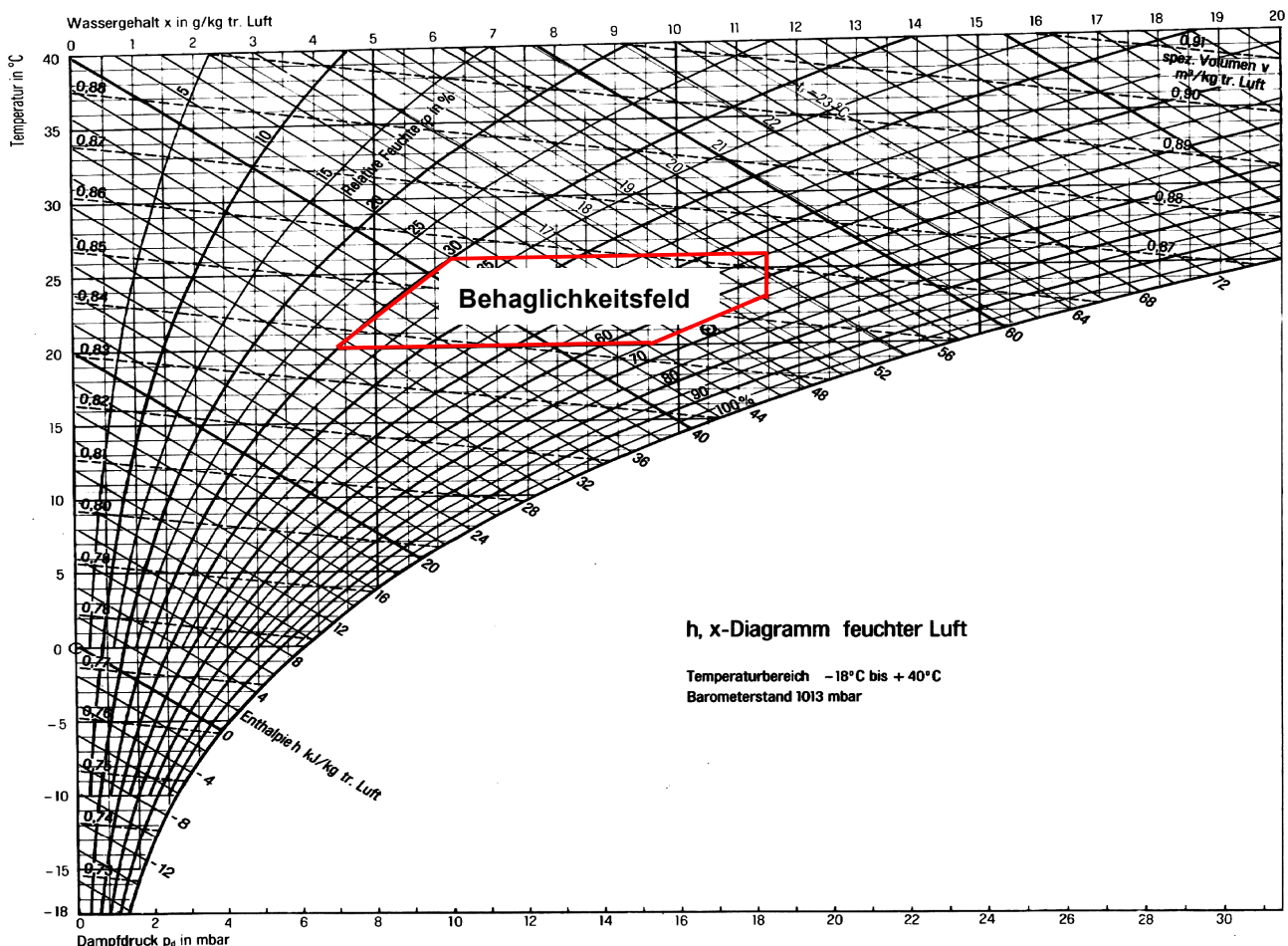


Abbildung 1: Thermische Behaglichkeit dargestellt im Mollier h, x-Diagramm

Um die entscheidenden Kriterien für das in der Abbildung 1 gezeigten Behaglichkeitsfeldes zu finden, wurden unter anderem von Prof. Fanger [11] experimentelle Untersuchungen mit Testpersonen durchgeführt. Die hierbei ermittelten Grenzwerte hinsichtlich Temperatur, Luftgeschwindigkeit und Temperatur der Raumumschließungsflächen gelten heute in der Klimatechnik als Standard und wurden zum Teil auch in die DIN 1946, Teil 2 [10] übernommen.

Um die Zusammenhänge der einzelnen Behaglichkeitsgrößen vor allem zwischen Temperatur und Luftfeuchte zu verstehen, werden sie im Folgenden kurz erläutert.

4.1 Temperatur

Der Mensch ist nicht in der Lage, die eigene Temperatur seiner Umgebung wahrzunehmen [12]. Er verspürt nur den Wärmestrom, der ihm auf Grund der vorgegebenen Temperaturdifferenz und des Wärmeübergangskoeffizienten entzogen wird. Als Beispiel wird eine Marmorplatte beim Berühren als kalt eine Dämmstoffplatte als warm empfunden, obwohl beide dieselbe Temperatur aufweisen können [19].

Zur Beurteilung der Wirkung des sich einstellenden Wärmestroms auf den menschlichen Körper müssen sowohl die Lufttemperaturen als auch die Temperaturen der Umschließungsflächen berücksichtigt werden.

4.1.1 Operative Raumtemperatur

Die empfundene Temperatur aus Gleichung 7, die auch als operative Raumtemperatur bezeichnet wird, ist näherungsweise das arithmetische Mittel der umgebenden Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur der Umgebungsoberflächen:

$$t_{\text{empf}} = \frac{t_L + t_s}{2}$$

Gleichung 7, [13]

Mit: t_{empf} = empfundene operative Raumtemperatur [°C];

t_L = Lufttemperatur [°C];

t_s = mittlere Strahlungstemperatur der Umgebungsoberflächen [°C].

Die Gleichung 7 ist gültig, solange die Differenz zwischen Raumlufttemperatur und Temperatur der Umschließungsflächen nicht größer als 3-4 Kelvin ist [14].

Die Temperatur der Umgebungsoberflächen ist ein Bestandteil der empfundenen Temperatur, da sich im Raum befindliche Personen im Strahlungsaustausch mit den umgebenden Flächen befinden.

Die genauere Berechnung der Strahlungstemperatur, die die geometrischen Verhältnisse im Raum berücksichtigt, lässt sich als Produkt der Einstrahlzahl mit der Temperatur der zugehörigen Flächen beschreiben (Gleichung 8) [10]:

$$t_s = \sum_{k=1}^n \varphi_k \cdot t_k$$

Gleichung 8, [10]

Mit: t_s = mittlere Strahlungstemperatur der Umgebungsoberflächen [°C];
 φ_k = Einstrahlzahl der Fläche k [-]
 t_k = mittlere Temperatur der Fläche k [°C]
 n = Anzahl der einzelnen Flächen [-]

Die Einstrahlzahl φ_k wird auch Winkelverhältnis genannt. Man definiert die Einstrahlzahl φ_k als das Verhältnis der von einer Fläche 1 ausgehenden und auf einer Fläche 2 auftreffenden Strahlung, zu der insgesamt von der Fläche 1 ausgehenden Strahlung [15].

In der DIN 1946 Teil 2 [10] wird die Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur festgelegt (vgl.: Abbildung 2). Der eingezeichnete obere und untere Randbereich in der Abbildung 2 wird noch als akzeptabel bezeichnet, wenn die empfohlene Raumtemperatur kurzzeitig über- bzw. unterschritten wird. Dieser Zulässigkeitsbereich der Raumtemperatur gilt für eine statische Tätigkeit im Sitzen mit leichter bis mittlerer Bekleidung (Wärmedurchlaßwiderstand von etwa $R_j = 0,12 \text{ [m}^2 \text{ K/W)]}$.

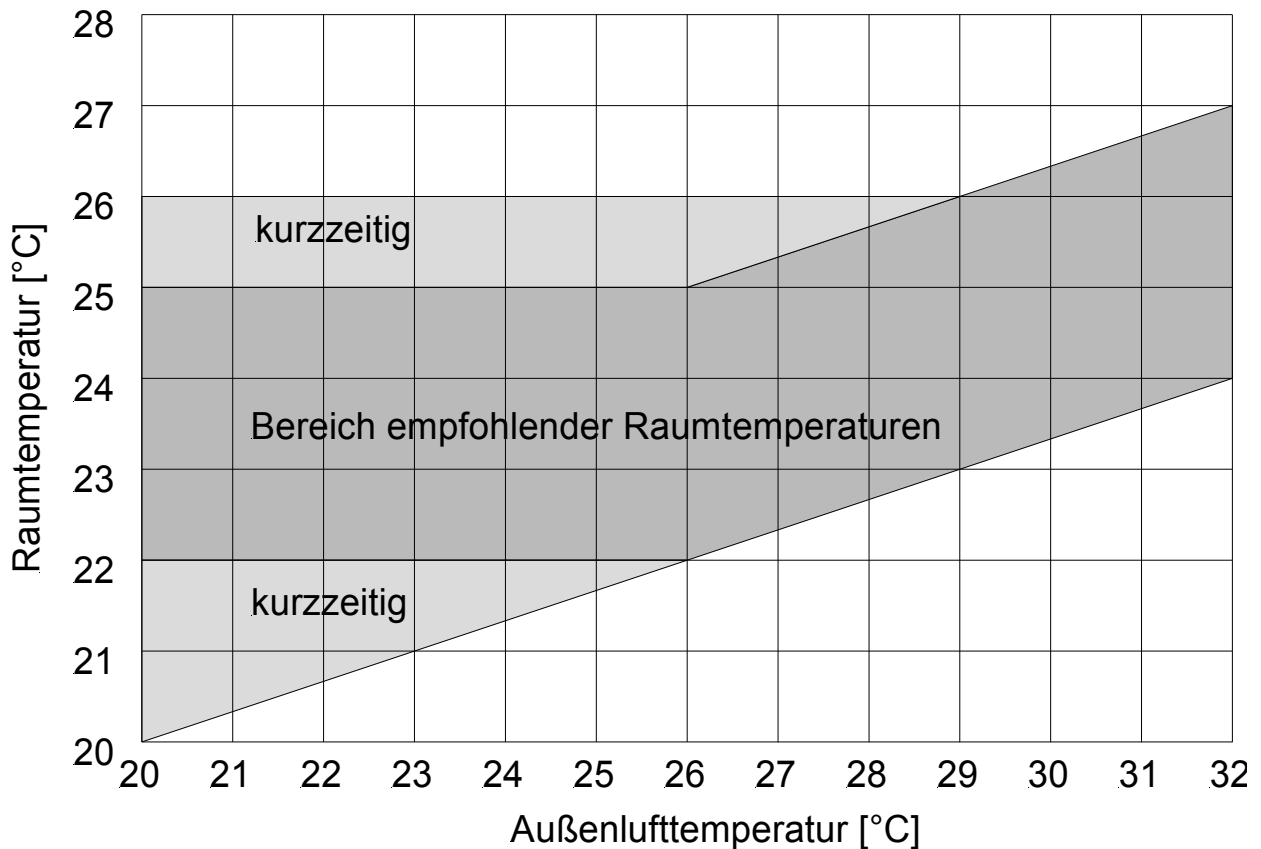


Abbildung 2: Zulässigkeitsbereich der Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur
DIN 1946/2 [10]

4.1.2 Temperaturgradient

Die vertikale Lufttemperaturschichtung sollte im Aufenthaltsbereich [16] zwischen 0,1 m und 1,1 m Raumhöhe etwa 2 Kelvin nicht überschreiten [16]. Die nachfolgende Abbildung 3 beruht auf Versuchen mit Personen, die nach 90 Minuten Aufenthaltsdauer im Raum subjektiv beurteilten, ob sie die vorgegebene Lufttemperaturschichtung als behaglich empfanden. In diesem Diagramm ist erkennbar, dass bei einem Temperaturanstieg im Bereich zwischen 0,1 m und 1,1 m Raumhöhe von 2 K mit 15 % unzufriedener Testpersonen zu rechnen ist, die die Temperaturschichtung als nicht behaglich empfinden.

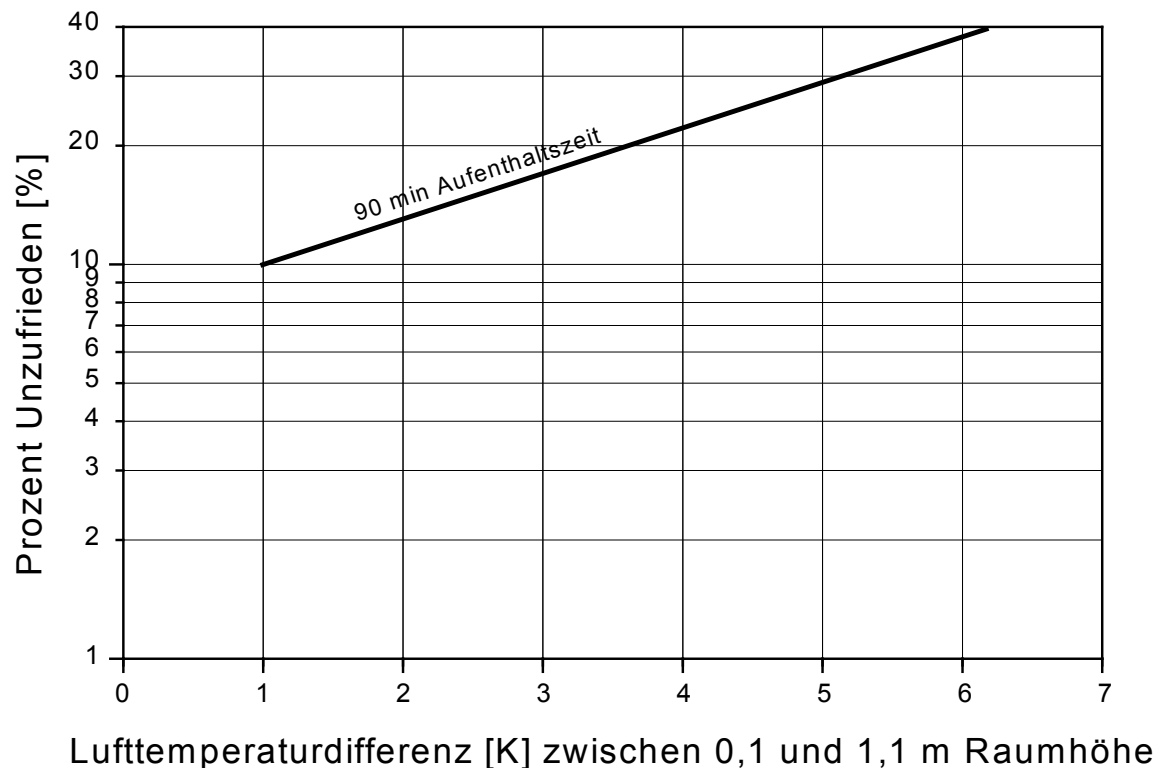


Abbildung 3: Der Lufttemperaturanstieg zwischen 0,1 und 1,1 m Raumhöhe in Abhängigkeit der Anzahl der Personen deren Komfortempfinden nicht erreicht wird nach [16].

4.2 Luftgeschwindigkeit

Die Luftgeschwindigkeit gilt als eine der wichtigsten Behaglichkeitsparameter in der Klimatechnik (vgl.: Kapitel 4.1). Der Mensch reagiert auf Luftbewegungen im Freien nicht besonders empfindlich. Oft werden diese sogar eher begrüßt als abgelehnt. Dagegen reagiert man in geschlossenen Räumen auf eine zu große Luftbewegung mit Unbehagen.

Der Behaglichkeitsbereich der Luftgeschwindigkeiten wird durch die Lufttemperatur und den Turbulenzgrad ausgedrückt. Der Turbulenzgrad gibt den zeitlichen Mittelwert der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeiten der Luft an [17]. Die Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit von Temperatur und Turbulenzgrad ist in Abbildung 4 [10] dargestellt.

Bei Überschreitung der angegebenen Grenzwerte ist mit der Unzufriedenheit von mehr als 15 % der Personen zu rechnen.

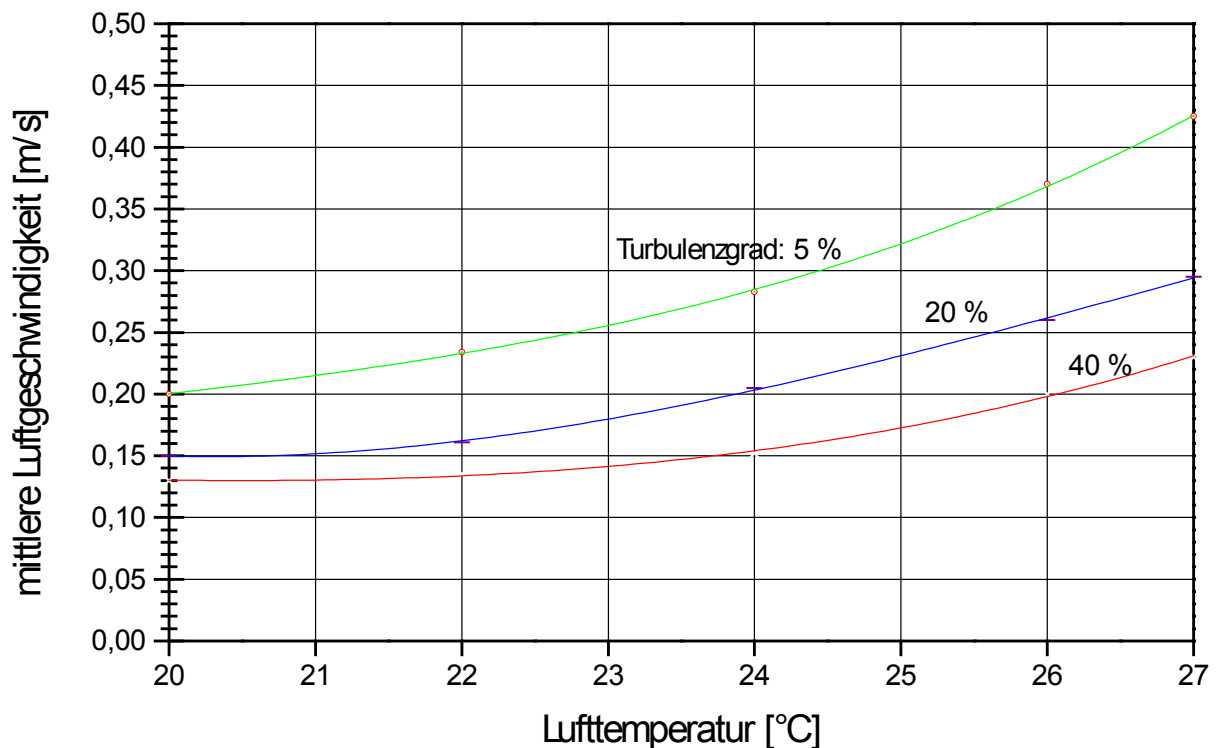


Abbildung 4: Mittlere Luftgeschwindigkeiten als Funktion von Temperatur und des Turbulenzgrades der Luft nach DIN 1946/2 [10] im Behaglichkeitsfeld

4.3 Luftfeuchte

Die Luftfeuchtigkeit, das heißt das in der Luft enthaltene Wasser, hat einen wesentlichen Einfluß auf die thermische Behaglichkeit. Aus diesem Grund wird der Luftfeuchte ein eigenes Kapitel gewidmet. Die relative Luftfeuchte kann bei tieferen Temperaturen (20 °C-22 °C) bis zu 65 % betragen, sollte jedoch bei Temperaturen von 25 °C oder 26 °C nicht mehr als 55 % betragen [19].

Um den Einfluß einer überhöhten Wassermenge in der Luft auf den Menschen zu erklären und die Notwendigkeit der Entfeuchtung zu unterstreichen, wird die Wärmeabgabe des Menschen eingehender im nächsten Kapitel beschrieben.

5 Die Wärmeabgabe des Menschen

Die Kälterezeptoren unter der Hautoberfläche bewirken im Zusammenspiel mit den Wärmerezeptoren im Stammhirn das Wärmeempfinden des Menschen. Einseitiger Wärmeentzug durch Strahlung und Konvektion kann über die Hautoberfläche registriert werden [18]. Dadurch lässt sich die Richtungsempfindlichkeit gegenüber Zugluft oder einer kalten Wand erklären.

Dass ein Mensch eine z. T. unangenehme Schwüle außerhalb des Behaglichkeitsbereiches empfinden kann, liegt daran, dass seine Wärmeabgabe an die Umgebung durch Verdunstung, auf Grund einer zu hohen Luftfeuchtigkeit behindert wird. Als Beispiel können die beiden hinsichtlich der Feuchte und der Temperatur völlig unterschiedlichen extremen klimatischen Zonen genannt werden:

- der tropische Regenwald
- und das Wüstenklima

Die in diesen beiden Regionen auftretenden Temperaturen können in ähnlichen Bereichen liegen, trotzdem kann der menschliche Körper die trockenere Hitze in der Wüste eher als im feuchten Regenwald ertragen. Dieser genannte Sachverhalt ist anschaulich am Beispiel einer Sauna nachzuvollziehen:

Die Lufttemperatur in der Sauna bleibt vor und nach einem Aufguß nahezu unverändert. Die Luftfeuchtigkeit wird jedoch durch die Wasserzugabe und die damit verbundene Dampfbildung derart gesteigert, dass die Feuchtigkeitsdifferenz zwischen Haut und Luft vermindert wird. Die Wärmeabgabe des Menschen mithilfe der Schweißbildung, deren treibendes Potential die genannte Feuchtigkeitsdifferenz ist, wird dadurch behindert. Um die damit verbundene verminderte Wärmeabgabe auszugleichen, muss der Körper die beim Saunagang beabsichtigte Schweißproduktion steigern. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass der Mensch in einem „Schwitzbad“ kurzzeitig Lufttemperaturen bis 100 °C vertragen kann, wenn die relative Feuchte unter 5 % liegt [15]. Zusammengefasst ist der Verdunstungsgrad in erster Linie von dem Dampfdruckunterschied des Wassers an der Hautoberfläche und dem Partialdruck der Luft abhängig. Die beispielhaft genannten Aufenthaltsbereiche des Menschen können nicht als behagliche eingestuft werden, dennoch helfen diese extremen Beispiele zum Verständnis des Einflusses

der Luftfeuchtigkeit auf die Wärmeabgabe des Menschen. Das Empfinden von Schwüle, bzw. die Schweißbildung auf der Haut, fängt bei einem normal gekleideten Menschen mit einem geringem Aktivitätsgrad (vgl.: Tabelle 1) in unseren Breiten bei einem absoluten Wassergehalt von 12 g/kg_{tr L} an [15]. Daraus folgt, dass bei einer relativen Feuchte von 60 % die Schweißbildung bei einer Lufttemperatur von 25 °C einsetzt, bei einer Luftfeuchte von 50 % jedoch erst bei 28 °C [15].

Bei behaglichen Lufttemperaturen erfolgt die Wasserdampfabgabe des Menschen unmerklich über die Hautoberfläche und die Atmung. Dabei verliert der menschliche Körper etwa 1 Liter Wasser täglich, was einer Wärmeabgabe von 2,4 MJ oder einem Drittel des Grundumsatzes entspricht. In der nachfolgenden Tabelle 1 [19] ist neben der Wärmeabgabe auch die zugehörige Wasserabgabe des Menschen bei unterschiedlichen Tätigkeiten bei einer Lufttemperatur von 20°C und 26°C dargestellt. Aus der Tabelle 1 ist ersichtlich, dass bei körperlicher Arbeit die in verstärktem Maße anfallende Wärme ebenfalls überwiegend (zu etwa 70 %) durch Wasserverdunstung abgegeben wird [18]. Steimle [19] weist in diesem Zusammenhang daraufhin, dass im neusten Entwurf der DIN 1946 Teil 2 nur die rein sensible Wärmeabgabe des Menschen als Kühllast aufgeführt ist und bei der Berechnung die Feuchtigkeitsabgabe diese thermisch nicht erfasst wird [19]!

Aktivität	20°C Lufttemperatur					26°C Lufttemperatur			
	Wärme	Strahlung	Konvektion	Verdunstung	Wasser	Strahlung	Konvektion	Verdunstung	Wasser
Sitzen	120 W	45 W	45 W	30 W	45 g/h	30 W	30 W	60 W	90 g/h
Maschine-schreiben	150 W	50 W	50 W	50 W	72 g/h	33 W	33 W	85 W	125 g/h
Reden (Vortrag)	200 W	60 W	55 W	85 W	125 g/h	40 W	37 W	123 W	180 g/h
Kellnern	250 W	65 W	70 W	115 W	170 g/h	43 W	45 W	162 W	230 g/h
Tanzen	300 W	65 W	80 W	155 W	220 g/h	43 W	50 W	207 W	300 g/h

Tabelle 1: Wärmeabgabe bei unterschiedlichen Aktivitäten und gleicher Kleidung [19]

Die durchschnittliche Feuchtigkeitsabgabe beträgt bei schwerer Arbeit unter normalen klimatischen Bedingungen etwa 1 Liter pro Stunde. Wie diese Schweißtröpfchenabgabe aussieht, kann der nachfolgenden Abbildung 5 entnommen werden.

Dargestellt ist die rasterelektronische 40 fache vergrößerte kolorierte Aufnahme von Schweißtröpfchen auf einem Handrücken nach einer Stunde körperlicher Betätigung [20].

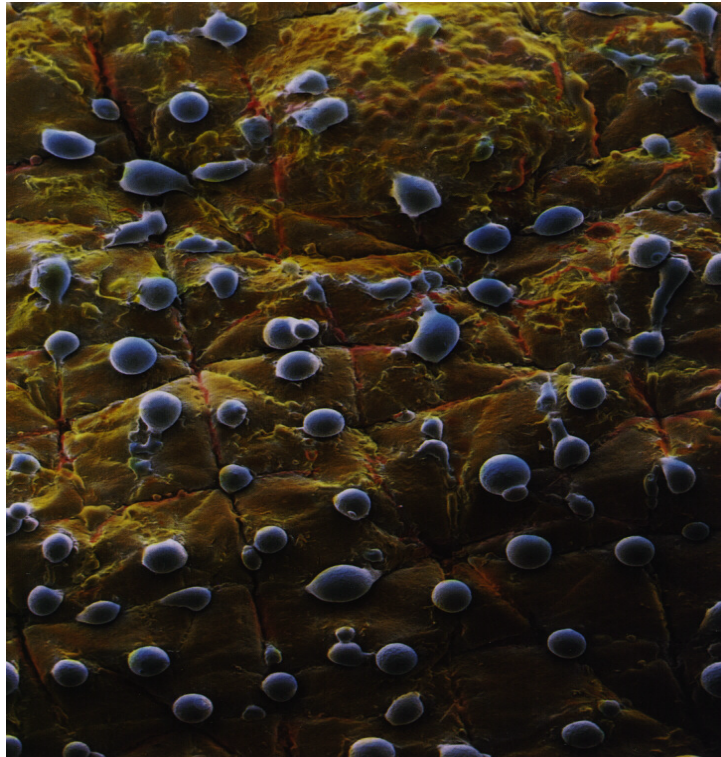


Abbildung 5: rasterelektronische kolorierte Aufnahme (40 fache Vergrößerung) von Schweißtröpfchen auf einem Handrücken nach einer Stunde körperlicher Betätigung [20].

Die Wärmeabgabe des Menschen an die Umgebung erfolgt im Wesentlichen über die Haut und die Atmung. Der Wärmeabstrom, der bei konstanter Kerntemperatur quantitativ dem Wärmeumsatz entspricht, erfolgt über drei Teilprozesse [18]:

- Wärmeleitung und -konvektion
- Wärmestrahlung
- Wasserverdunstung

5 Die Wärmeabgabe des Menschen

Um die Wärmeabgabe des Menschen an die Umgebung über diese drei Teilprozesse zu verstehen, werden im nachfolgenden zwei Betrachtungsweisen verfolgt:

1. Die vermehrte Wärmeabgabe bei Aktivitätssteigerung
2. Die vermehrte Wärmeabgabe beim Ansteigen der operativen Raumtemperatur

Betrachten wir zunächst die Wärmeabgabe des Menschen bei der Steigerung seiner Aktivitäten, hier ausgedrückt durch den Wärmeumsatz. In der Abbildung 6 ist erkennbar, dass die Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion mit dem Wärmeumsatz im Verhältnis zur Verdunstung nur langsam zunimmt.

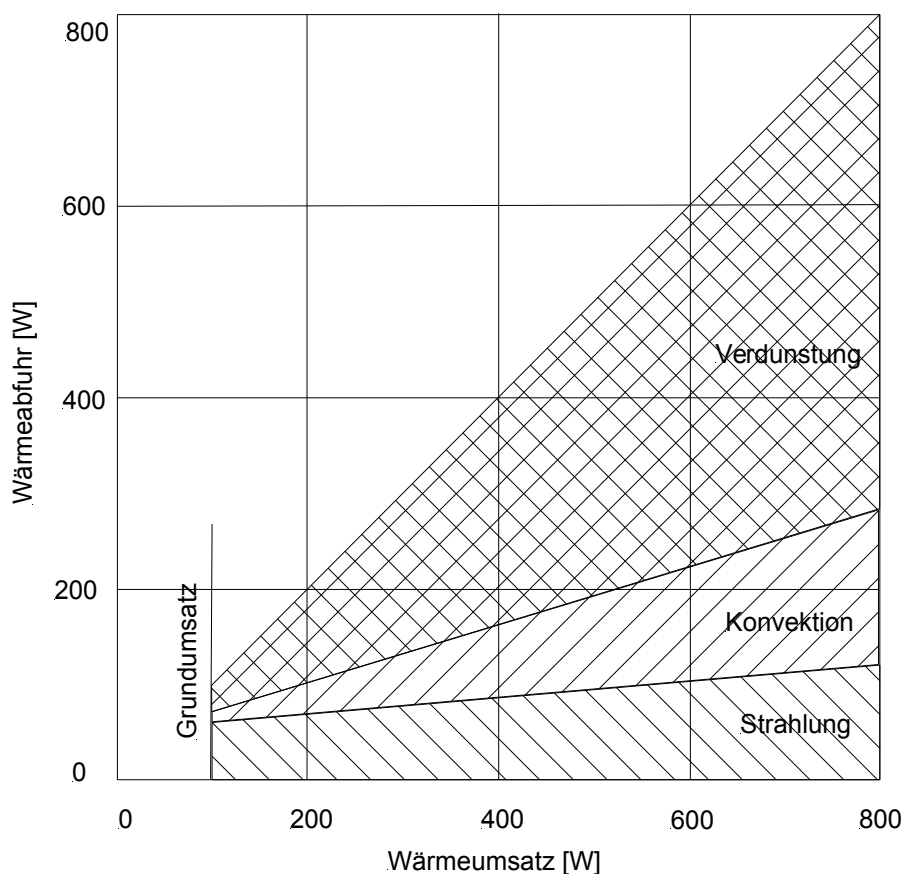


Abbildung 6: Die Wärmeabfuhr des menschlichen Körpers in Abhängigkeit des Wärmeumsatzes [21].

In der Abbildung 7 ist die Abhängigkeit des Wärmeumsatzes bei steigender Lufttemperatur dargestellt. Zu erkennen ist, dass hier bei einer operativen Temperatur von etwa 33 °C keine Wärmeabgabe über Strahlung und Konvektion erfolgt. Bei weiter ansteigender Temperatur muss die Wärmeabgabe durch Verdunstung die aufgenommene Strahlung und die aufgenommene Konvektion sogar zusätzlich mit ausgleichen.

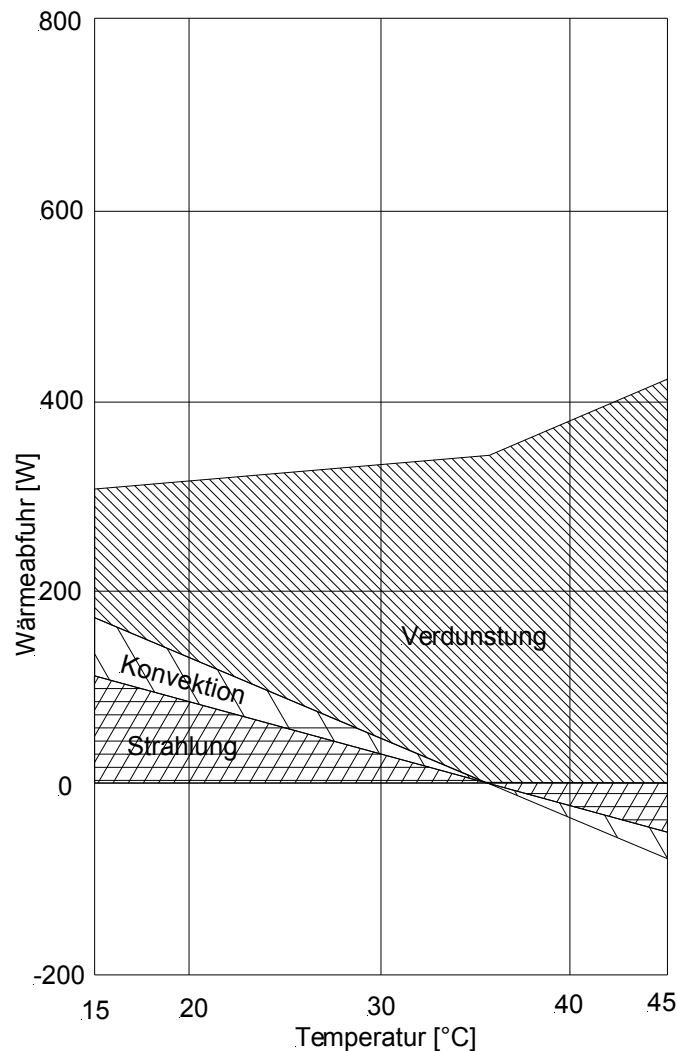


Abbildung 7: Der Wärmeumsatz des menschlichen Körpers in Abhängigkeit der Temperatur [21]

Dieser dargestellte Zusammenhang geht dabei von Räumen aus, in denen der Mensch von keiner direkten Strahlung erreicht wird. Die Körperoberfläche ist in der Regel von einer kühleren Luftgrenzschicht umgeben, so dass Wärme –dem Temperaturabfall folgend– an die Umgebung abgeleitet werden kann.

Die Wärmeabgabe durch Konvektion wird durch die Luftgeschwindigkeit beeinflusst. Die Wärmeabgabe durch Strahlung ist von der Hauttemperatur, jedoch nicht von der

Lufttemperatur abhängig. Dadurch kann der strahlungsbedingte Wärmestrom auch in Richtung auf den menschlichen Körper gerichtet sein [18].

Aufgrund der konstanten Körpertemperatur bei vorgegebener Bekleidung und gleichbleibendem Aktivitätsgrad wird dem Raumnutzer nur im Bereich der Wärmeabgabe durch Verdunstung die Möglichkeit gegeben, in seinen Temperaturregelmechanismus einzugreifen. Aus diesen Überlegungen folgert Steimle [21], dass in einem Raum mit unterschiedlicher Belastung den einzelnen Raumnutzern für sich selbst die Möglichkeit gegeben werden muss, sich durch Veränderung seiner Wasserabgabe dem vorhanden Raumluftzustand anzupassen. Dies verlangt jedoch eine geringe relative Luftfeuchtigkeit.

Die Notwendigkeit der Luftentfeuchtung für die Wärmeabgabe des Menschen ist aus vorhergehendem Kapitel verständlich geworden. Außer der Raumluftentfeuchtung gibt es weitere Anwendungsgebiete für die Reduzierung der Luftfeuchte, die im nächsten Kapitel beschrieben werden.

6 Notwendigkeit der Luftentfeuchtung

Außer dem Einfluß der Luftfeuchte auf die Wärmeabgabe des Menschen und die damit verbundene Raumlufentfeuchtung gibt es weitere Anwendungsgebiete für die Reduzierung der Luftfeuchte, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Das Anwendungsgebiet der Luftentfeuchtung lässt sich in die Bereiche der Raumluf- und der Prozessluftentfeuchtung unterteilen:

6.1 Raumlufentfeuchtung

Die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit an einem offenen Absorptionssystem zur Entfeuchtung in Kreuzstromfahrweise wurden hinsichtlich der vorgegebenen Eingangsparameter der feuchten Luft auf die Raumlufentfeuchtung abgestimmt.

Steimle wie auch Fanger [22] weisen darauf hin, dass der Einfluß der Luftfeuchtigkeit in Räumen auf den Menschen seit Jahrzehnten ignoriert wurde. Fanger [22] stellt fest, dass die empfundene Luftqualität in direktem linearen Zusammenhang mit der Feuchtigkeit und der Temperatur der Luft steht [23], [24], [25]. Die Menschen bevorzugen eher trockene und kühle Luft [22]. Aus Fangers Untersuchungen geht hervor, dass beispielsweise, ausgehend von 23 °C und einer relativen Feuchtigkeit von 50 %, eine Abkühlung der Luft um 3 Kelvin ohne Veränderung des Wassergehaltes den notwendigen Lüftungsbedarf um 25 % senken würde. Der gleiche Effekt ist bei einer konstanten Unzufriedenheitsquote von 20% erreicht, wenn die relative Luftfeuchtigkeit um 10 % gesenkt werden würde. Es ist daher auch laut Fanger [22] ratsam, eine im unteren Bereich des Behaglichkeitsfeldes niedrige Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur beizubehalten, um die Wärmeneutralität des Menschen zu gewährleisten. Dies kann potentielle Energieeinsparungen im Winter als auch im Sommer mit sich bringen.

Ein weiterer Anwendungsbereich der Raumlufentfeuchtung sind z. B. Museen, in denen eine reduzierte und konstante Luftfeuchte notwendig ist, um den Erhalt von Kunstwerken auf Dauer zu gewährleisten.

6.2 Prozessluftentfeuchtung

Im allgemeinen ist die Prozessluftentfeuchtung für die Konservierung und Werterhaltung von Gebäuden und technischen Anlagen notwendig. Als Beispiel kommen die aufwendigen Anstricharbeiten in Wasserwerken in Betracht, um die mit kaltem Wasser durchflossenen Rohre, Armaturen, Behälter und Pumpen vor der durch Schwitzwasser verursachten Korrosion zu schützen [26].

Eine zu große relative Luftfeuchtigkeit bewirkt bei Metallen Korrosion. Die Korrosionsgeschwindigkeit ist am größten, wenn die Temperatur der Metalloberfläche unter dem Taupunkt liegt und dadurch der in der Luft enthaltene Wasserdampf auf der Materialoberfläche kondensiert. In der nachfolgenden Abbildung 8 von Vernon [27] aus dem Jahre 1935 ist die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl bzw. die verhältnismäßige Gewichtszunahme durch Oxidationsvorgänge in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte mit einem Schwefeldioxidgehalt der Umgebungsluft von 0,01 % aufgetragen. Laut den Richtlinien für Arbeitsstätten beträgt der zulässige Grenzwert des SO_2 am Arbeitsplatz nur 1/5000 des angegebenen Wertes, so dass die in der Abbildung 8 aufgetragene Korrosionsgeschwindigkeit nur 1/10 des Diagrammwertes beträgt. Dennoch ist in der Abbildung 8 deutlich erkennbar, dass die Korrosion von Stahl unterhalb einer relativen Luftfeuchte von 35 % praktisch vermieden wird [26].

Auf der Ordinate der Abbildung 8 ist die Gewichtszunahme pro Flächeneinheit aufgetragen, die durch die Oxidationsvorgänge (Rostbildung) nach 55 Tagen verursacht wird.

Als Faustformel für den Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Korrosion gilt allgemein:

unter $\varphi = 70$ % relativer Luftfeuchte	=> keine Schimmelbildung;
unter $\varphi = 50$ % relativer Luftfeuchte	=> keine schwere Rostbildung und
unter $\varphi = 35$ % relativer Luftfeuchte	=> keine Rostbildung an blank polierten Stahlflächen [26].

In manchen Kraftwerken kommen zur Überbrückung von Spitzenlasten modernste Gasturbinen als Reserve zum Einsatz. Dies erfordert Konservierungsmaßnahmen zur Verhinderung von Stillstandskorrosion. Diese kann bei einer durch Restwasser bedingten überhöhten Luftfeuchtigkeit auftreten. Die Trockenluftkonservierung kann, wie der Name schon sagt, durch das Einblasen von trockener Luft geschehen [28].

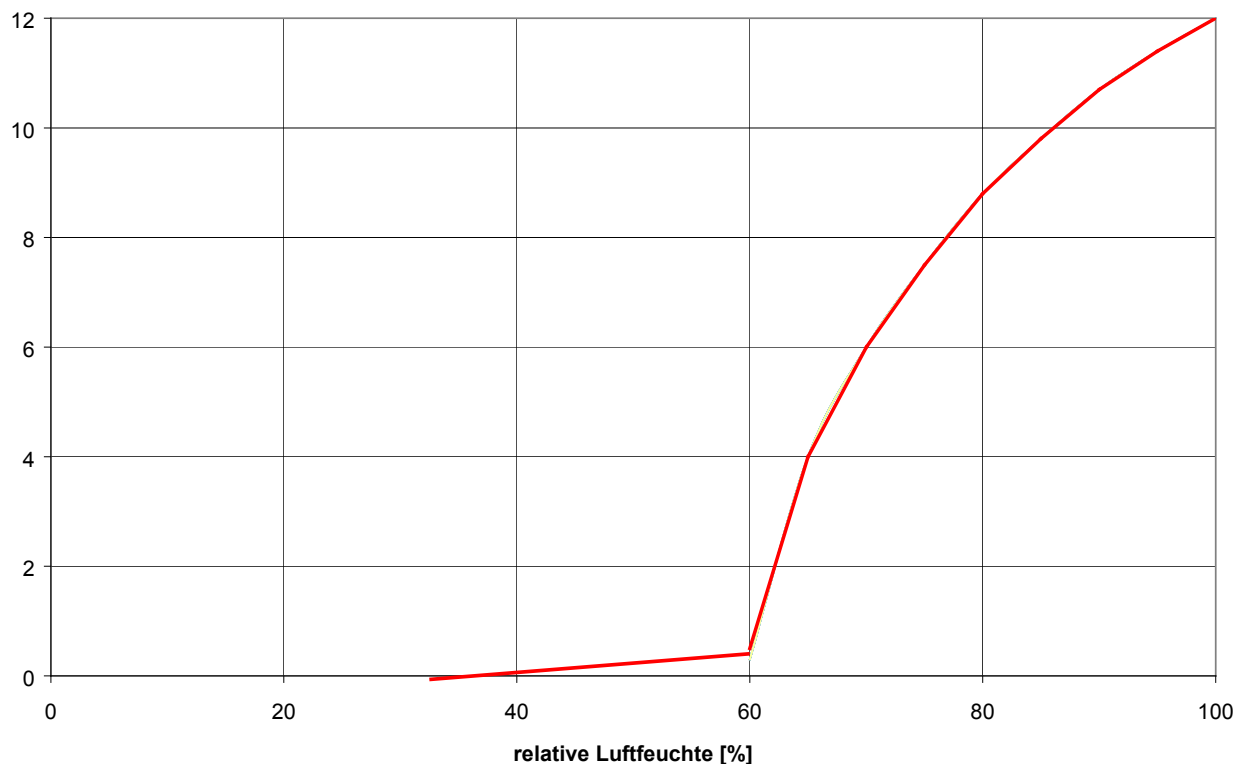


Abbildung 8: Gewichtszunahme durch Korrosion auf Grund von Oxidationsvorgängen von Stahl in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte mit 0,01 % SO_2 in der Umgebungsluft nach W. H. I. Vernon [27]

Als weitere Anwendungsbereiche der Prozessluftentfeuchtung sind z. B. die Pharmazie und die Halbleiterindustrie zu nennen:

Im pharmazeutischem Bereich ist eine reduzierte Luftfeuchtigkeit bei der Verpackung von stark hygroskopischen Medikamenten wichtig; ganz speziell z. B. bei der Herstellung und dem Befüllen von Hartgelatine kapseln [29]. In der Halbleiterindustrie wird im Bereich der Waferherstellung eine geringe Luftfeuchte benötigt.

Die Notwendigkeit der Luftentfeuchtung wird an den meteorologischen Daten deutlich, auf die im nachfolgenden Kapitel näher eingegangen wird.

6.3 Meteorologische Daten

Aus dem vorhergehenden Abschnitt ist deutlich geworden, warum eine geringe Luftfeuchtigkeit angestrebt und eingehalten werden sollte. Anhand der meteorologischen Daten der Bundesrepublik Deutschland kann gezeigt werden, dass eine außerhalb des Behaglichkeitsfeldes befindliche Luftfeuchtigkeit viel häufiger auftritt als eine unbehagliche Temperatur.

In der DIN 4710 [30] sind die meteorologischen Daten für ausgewählte Orte der Bundesrepublik Deutschland enthalten. Mit diesen Daten kann die erforderliche spezifische Energie berechnet werden, um die latenten wie sensiblen Lasten abzuführen [31]. Unter den Lasten verstehen sich alle klimatischen Zustände oberhalb einer Temperatur von 20 °C und einer absoluten Feuchte von 8 g_w/kg_{tr L}.

Nach Harrimann [31] lassen sich die spezifischen Energien wie folgt berechnen:

- Latente Last:

$$q_{\text{lat}} = (\bar{x}_{\text{Au}} - x_{\text{zu}}) \cdot r_0 \cdot \rho_L \cdot Z_x \quad \text{Gleichung 9 [38]}$$

Mit: q_{lat} = spezifische Energie zum Abführen der latenten Last [kWh/(m³/h)a]

\bar{x}_{Au} = mittlere Außenluftfeuchte [kg_w/kg_{tr L}]

x_{zu} = Zuluftfeuchte [kg_w/kg_{tr L}]

r_0 = spezifische Verdampfungsenthalpie bei 0 °C = 2501,6 [kJ/kg]

ρ_L = Dichte der Luft [kg/m³]

Z_x = jährliche Entfeuchtungsstunden [h/a]

- Sensible Last:

$$q_{\text{sens}} = (\bar{t}_{\text{Au}} - t_{\text{zu}}) \cdot c_{pL} \cdot \rho_L \cdot Z_t \quad \text{Gleichung 10 [38]}$$

Mit: q_{sens} = spezifische Energie zum Abführen der sensiblen Last [kWh/(m³/h)a]

\bar{t}_{Au} = mittlere Außentemperatur [°C]

t_{zu} = Zulufttemperatur [°C]

c_{pL} = spezifische Wärmekapazität bei 0°C = 1,004 [kJ/kgK]

ρ_L = Dichte der Luft [kg/m³]

Z_t = jährliche Kühlstunden [h/a]

Für einige ausgewählte Orte der Bundesrepublik Deutschland sind die so berechneten Werte aus [38] in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Im Verhältnis der latenten zur sensiblen Last in der letzten Spalte [$q_{\text{lat}}/q_{\text{sens}}$], geben die Werte größer als 1 diejenigen Orte an, in denen mehr Energie zum Entfeuchten als zum Kühlen von Aufenthaltsbereichen aufgewendet werden muss, um in das im Kapitel 3 genannte Behaglichkeitsfeld zu gelangen.

Standort	q_{lat} [kWh/(m ³ /h)a]	q_{sens} [kWh/(m ³ /h)a]	q_{ges} [kWh/(m ³ /h)a]	$q_{\text{lat}}/q_{\text{sens}}$ [kWh/(m ³ /h)a]
Berlin	0,61	0,79	1,40	0,78
Braunschweig	0,89	0,59	1,47	1,50
Bremerhaven	0,94	0,31	1,25	3,06
Essen	0,85	0,51	1,36	1,68
Frankfurt	1,01	0,99	2,00	1,02
Gießen	0,71	0,69	1,40	1,02
Hamburg	0,78	0,44	1,22	1,76
Mannheim	1,03	1,11	2,14	0,93
München	0,97	0,75	1,72	1,3
Nürnberg	0,81	0,88	1,69	0,93
Regensburg	0,94	0,79	1,73	1,18
Stuttgart	0,91	0,65	1,56	1,40
Trier	0,88	0,63	1,51	1,40
Durchschnitt	0,87	0,70	1,57	1,24

Tabelle 2: Nach Harriman [31] berechnete Kühl- und Entfeuchtungslasten für ausgewählte Städte der Bundesrepublik Deutschland aus [38], für alle klimatischen Zustände oberhalb einer Temperatur von 20 °C und einer absoluten Feuchte von 8 g_w/kg_{tr L}

Anhand der Durchschnittszahlen in der letzten Zeile wird deutlich, dass in Deutschland -bis auf wenige Ausnahmen- an mehr Tagen die Luft entfeuchtet, als deren Temperatur gesenkt werden muss, um ein behagliches Raumklima zu erreichen und aufrechtzuerhalten.

Aus diesem Grund fordert Steimle, dass Entfeuchtung wichtiger als Kühlung ist [32]. Daraus folgernd verlangt Steimle vom Klimatechniker die Fähigkeit, die Kältetechnik konsequent in die Klimaanlage zu integrieren und nicht die Kältetechnik nur als Zurüstteil zu betrachten [33].

An dieser Stelle sei auf den in der Einleitung bereits beschriebenen Leitgedanken zurückgegriffen:

Der eingesetzte Wärmeentzug durch die Kältetechnik sollte ausschließlich für die Temperaturabsenkung verwendet werden, hingegen die Entfeuchtung durch andere im nachfolgendem Kapitel: 7 beschriebenen Prozesse realisiert werden.

7 Verfahren der Luftentfeuchtung

Aus dem vorhergehenden Kapitel: „Notwendigkeit der Luftentfeuchtung“ wurde deutlich, dass es wichtiger ist, die Luft zu entfeuchten als nur die Raumlufttemperatur zu senken, um ein behagliches Raumklima zu erreichen und aufrechtzuerhalten.

In diesem Kapitel werden die beiden grundsätzlichen Möglichkeiten und Verfahren der Luftentfeuchtung mit Ihren Vor- und Nachteilen beschrieben.

7.1 Taupunktunterschreitung

Die klassische Methode, den absoluten Wassergehalt der Luft zu verringern, wird durch die Abkühlung der zu entfeuchtenden Luft unter ihre Taupunkttemperatur erreicht. Dies kann durch den Kontakt der Luft mit einem Kühler geschehen. Die niedrigen Oberflächentemperaturen des Kühlers können entweder indirekt mit den typischen Auslegungstemperaturen (6 °C/12 °C) von Kaltwassersätzen oder durch direkt im Kühler verdampfendes Kältemittel erreicht werden. Im h, x-Diagramm in der Abbildung 9 ist die Abkühlung der Luft vom Zustandspunkt „1“ der Außenluft ($\phi = 40 \%$, $t = 32 \text{ °C}$) zum Zustandspunkt „2“ ($\phi = 80 \%$, $t = 16 \text{ °C}$) eingetragen. Am Zustandspunkt „2“ hat die Luft mit 16 °C eine so geringe Temperatur erreicht, dass sie, unter Beachtung der Behaglichkeitskriterien, ohne Nacherwärmung zum Zustandspunkt „3“ dem Raum nicht direkt zugeführt werden kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Raum durch eine Quelluftanlage belüftet wird, da die Einblastemperaturen der Luft hier üblicherweise nur 2 bis 3 Kelvin unter der Temperatur der Raumluft liegen [3].

Nachfolgend werden in Stichpunkten die Vor- und Nachteile der Entfeuchtung durch die Taupunktunterschreitung zusammengefasst:

Vorteile der Verfahren durch Taupunktunterschreitung:

- einfacher Aufbau.

Nachteile der Verfahren durch Taupunktunterschreitung:

- der „Zustandspunkt“ der Zuluft kann nicht direkt erreicht werden,
- die abgekühlte Luft muss durch einen zusätzlichen Nacherhitzer erwärmt werden,
- zum Erreichen der Taupunkttemperatur muss ein Kälte Träger auf durchschnittlich 6 °C abgekühlt werden.

7 Verfahren der Luftentfeuchtung

Die beiden letzten Punkte bringen einen vermeidbaren erhöhten Energieaufwand mit sich.

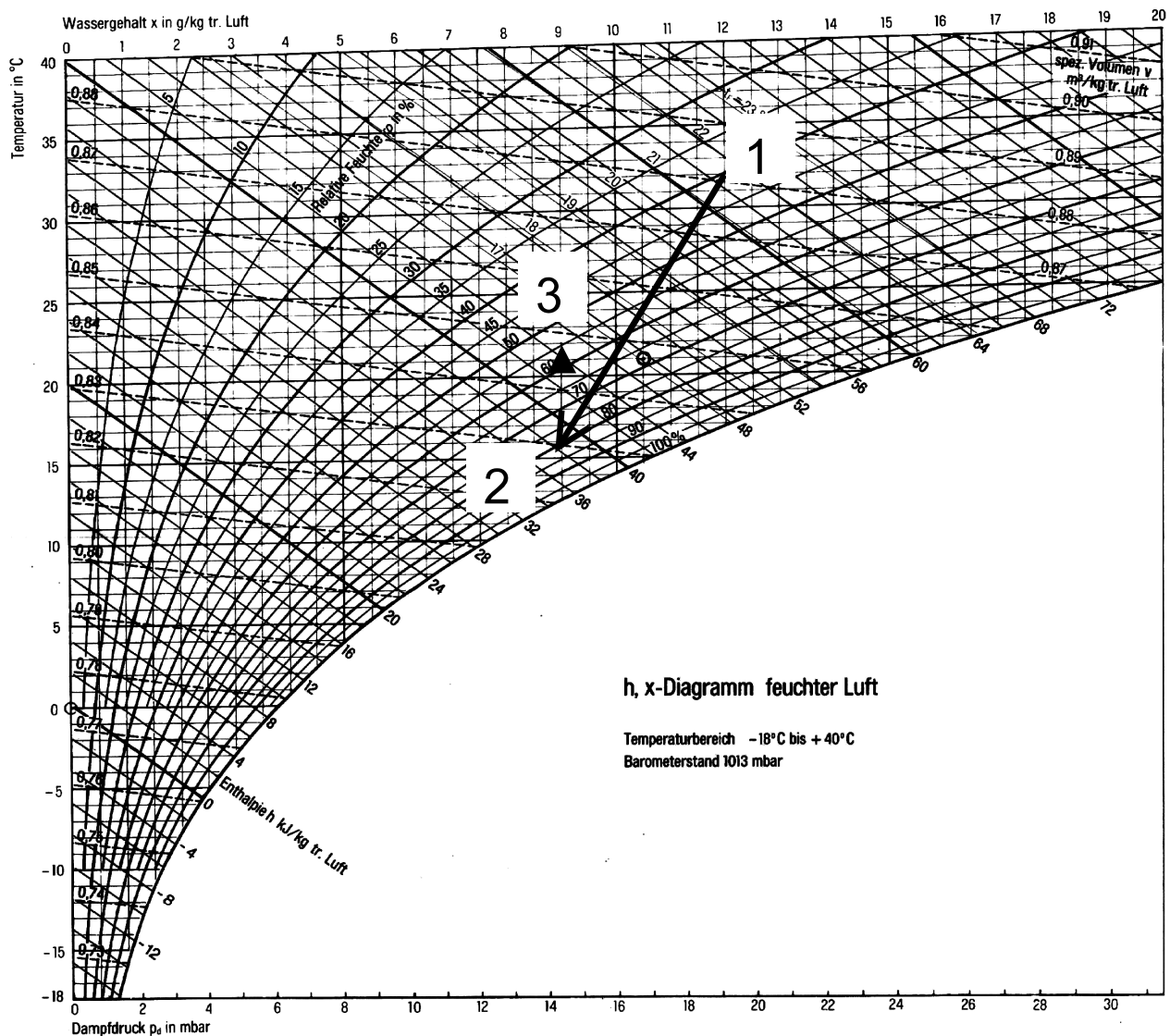


Abbildung 9: h, x-Diagramm eingezeichnet ist die Abkühlung der Luft durch einen Oberflächenkühler vom Zustandspunkt „1“ nach „2“ und die notwendige Nacherwärmung zum Erreichen des Zuluftpunktes Zustandspunkt „3“.

Die genannten Nachteile der Verfahren durch Taupunktunterschreitung können durch die Anwendung der hygroskopischen Effekte vermieden werden. Was unter den hygroskopischen Effekten verstanden wird und wie diese Effekte in der Klimatechnik ausgenutzt werden können, wird im folgenden Kapitel: 7.2 erläutert.

7.2 Hygroskopische Effekte

Die zweite Möglichkeit, der Luft ihre Feuchtigkeit zu entziehen, besteht darin, die Luft in direkten Kontakt mit hygroskopischen Materialien zu bringen. Die treibende Kraft für diesen wasseranziehenden Effekt ist der geringere Partialdruck der hygroskopischen Materialien gegenüber dem Partialdruck des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes. Der hygroskopische Effekt wird in der Klimatechnik im Bereich der Sorptionstechnik ausgenutzt.

7.2.1 Sorptionstechnik

Unter dem Begriff Sorption versteht man im Bereich der Luftentfeuchtung die Bindung von dampfförmigen Wassermolekülen an eine flüssige oder feste Phasengrenze. Die Sorptionstechnik wird in zwei Bereiche eingeteilt, die durch die Form der Salzstruktur der Salze festgelegt wird. Es wird zwischen festen kristallinen Salzen und flüssigen wässrigen Salzlösungen, die auch als Sorbentien bezeichnet werden, unterschieden. Wenn bei der Aufnahme des Wasserdampfes in feste hygroskopische Materialien nur physikalische Bindungskräfte auftreten, spricht man von Adsorption. Bei der Kondensation in Flüssigkeiten spricht man von Absorption oder Chemisorption. Eine schematische Darstellung der Sorptionsmechanismen von Rösen [34] wird in der Abbildung 10 gezeigt.

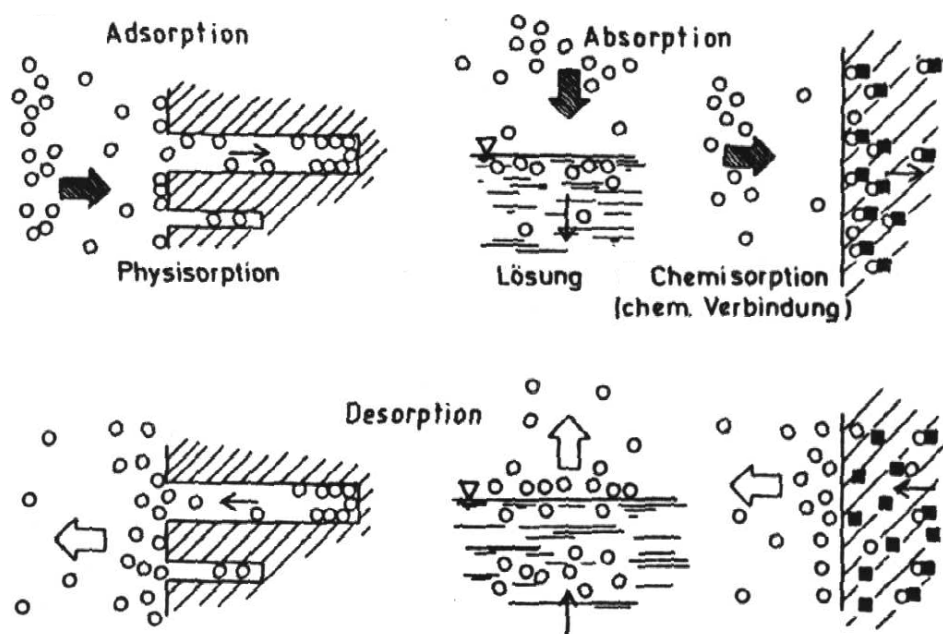


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Sorptionsmechanismen [34]

Eine weitere Unterteilung erfährt die Sorptionstechnik durch die Unterscheidung zwischen geschlossenen und offenen Kreisläufen. In den Bereich der geschlossenen Kreisläufe fällt z. B. das Anwendungsgebiet der Absorptionskältemaschinen. Bei den offenen Kreisläufen wird die zu entfeuchtende Luft einmalig in direkten Kontakt mit den Salzen gebracht.

Damit das verwendete Salz wieder verwendet werden kann, muss die aus der Luft aufgenommene Feuchtigkeit aus dem Sorbens ausgetrieben werden. Diese Regeneration wird sowohl bei der Absorption als auch bei der Adsorption als Desorption bezeichnet. Bei den mit wässrigen Salzlösungen betriebenen Entfeuchtern kann die verwässerte Salzlösung einer externen Regeneration zugeführt werden. Hierfür kann Niedertemperaturwärme, z. B. in Form von regenerativer Solarenergie, verwendet werden.

Im Bereich der Sorptionstechnik, die mit festen hygroskopischen Stoffen arbeitet, sind die Rotationsräder bekannt, wie z. B. in der Abbildung 11 der Firma Klingenburg gezeigt.

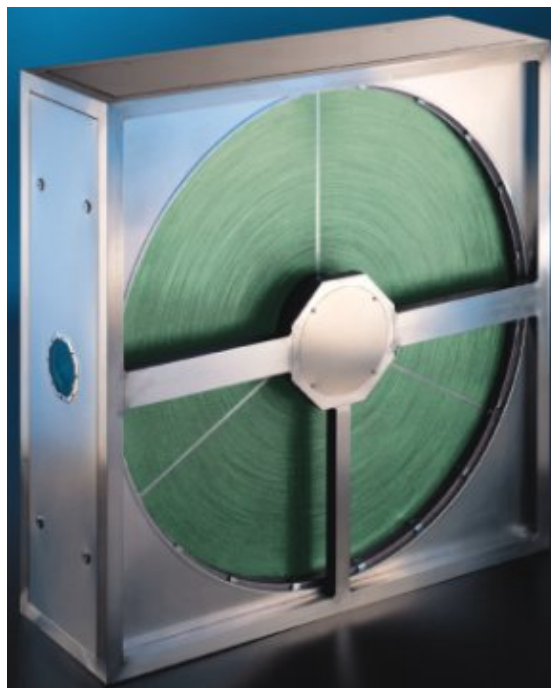


Abbildung 11: Sorptionsgenerator Typ Secco der Firma Klingenburg [35]

In der folgenden Abbildung 12 ist die Funktionsweise dieser mit festen Sorbentien beschichteten Sorptionsregeneratoren gezeigt. Die Außenluft wird durch das Sorptionsrad (1) vom Zustandspunkt 3 nach 4 entfeuchtet und durch das Freiwerden der Bindungsenergie zwischen Salz und Wasser erwärmt. Die Abluft (5) muss im Erhitzer (2) auf die Regenerationstemperatur nacherwärmt werden, um die vom Zustandspunkt 3 aufgenommene Feuchte über die Abluft (6) abzuführen und das Rad so zu regenerieren.

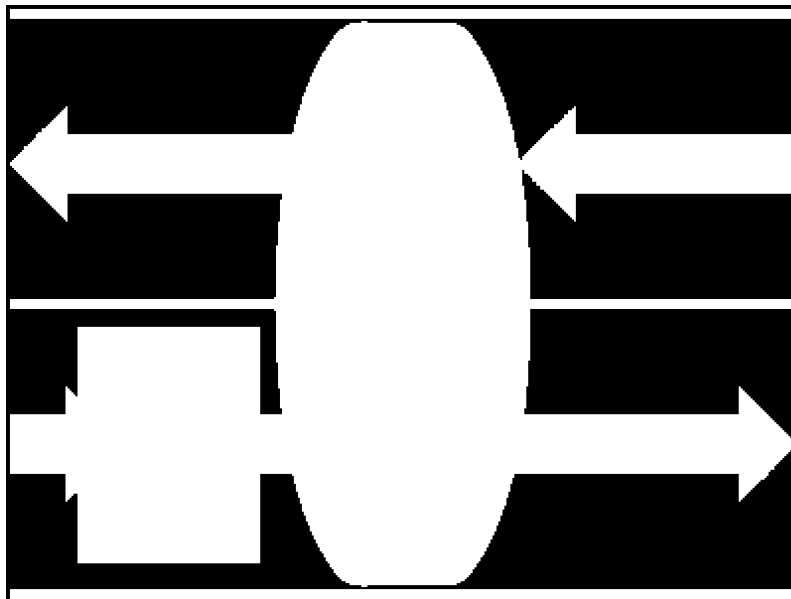


Abbildung 12: Schematische Funktionsweise eines Sorptionsregenerators [35].

7 Verfahren der Luftentfeuchtung

Im h, x -Diagramm in Abbildung 13 sind die Entfeuchtungsprozesse der mit kristallinen Salzen bzw. wässrigen Salzlösung arbeitenden Entfeuchtungsanlagen eingetragen.

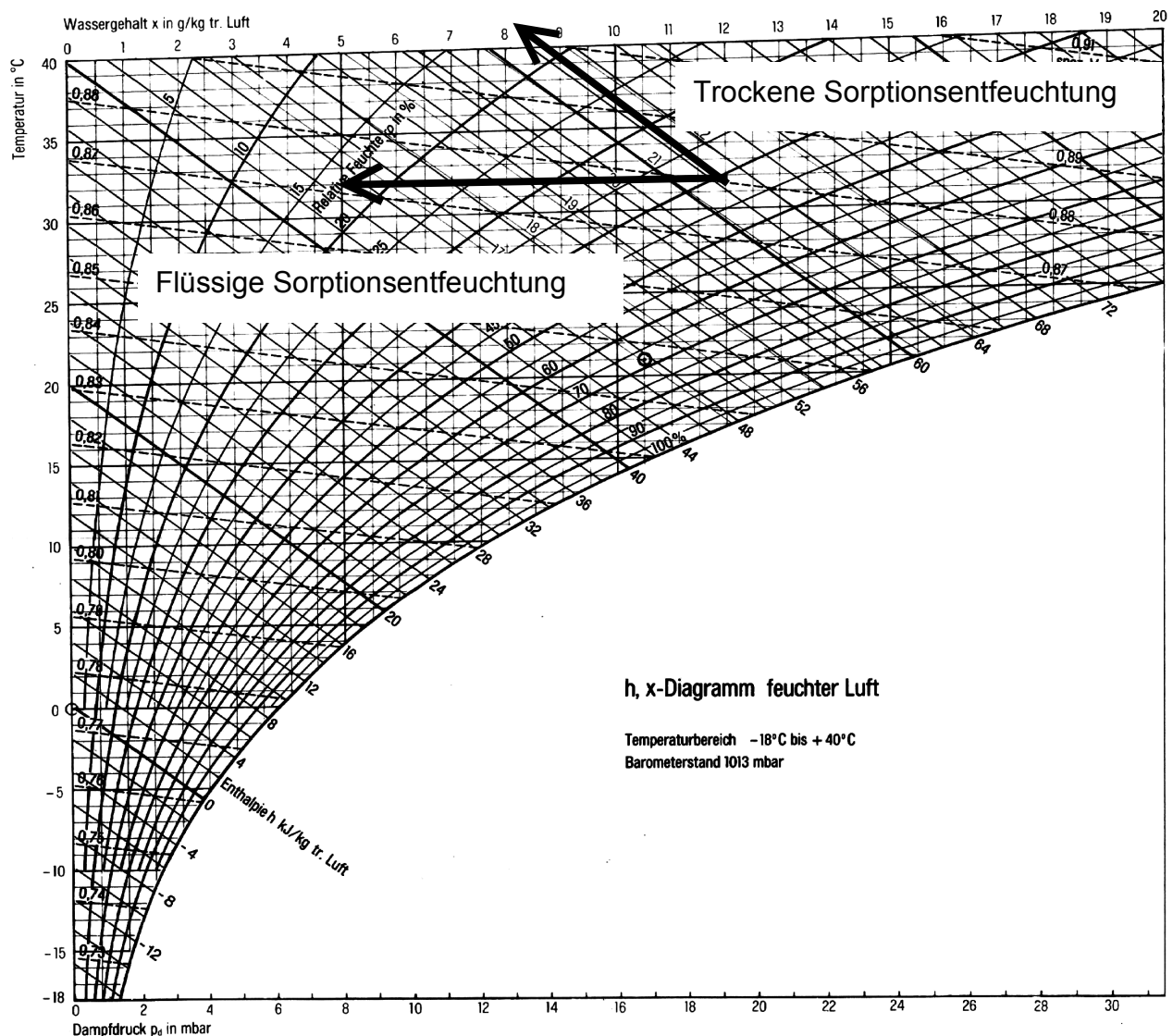


Abbildung 13: h, x -Diagramm eingetragen ist die sorptive Entfeuchtung mit Prozesskühlung (flüssige Sorptionsentfeuchtung) und die Entfeuchtung durch ein Sorptionsrad (trockene Sorptionsentfeuchtung)

Der Vorteil der „flüssigen“ gegenüber der „trockenen“ Sorptionsentfeuchtung ist im dargestellten Verlauf zu erkennen. Die theoretisch mögliche Entfeuchtungsbreite liegt bei der trockenen Sorptionsentfeuchtung bei 4 [g/kg_{tr.L.}], bei der flüssigen Sorptionsentfeuchtung bei ~ 7 [g/kg_{tr.L.}].

Bei dem hygroskopischen Effekt wird die Bindungsenergie zwischen Wasser und Salz in Form von Wärme frei.

Die im h, x -Diagramm in der Abbildung 13 gezeigte horizontal verlaufende Entfeuchtung ist mit Hilfe der mit einer wässrigen Salzlösung arbeitenden Sorptionssysteme möglich, da hier die entstehende Sorptionswärme direkt abgeführt werden kann, ohne die Luft zu erwärmen. Um die umgewandelte Sorptionswärme abzuführen wird das die Feuchtigkeit aufnehmende Salz über eine Stegdoppelplatte geführt, deren Kanäle mit Kühlwasser durchströmt werden. Die trockene Sorptionsentfeuchtung ist mit den beschriebenen Sorptionsrädern erreichbar; hier kann die Prozesswärme jedoch nicht unmittelbar abgeführt werden. Sie wird von der entfeuchteten Luft aufgenommen und mitgeführt. Die entstandene Wärme muss dann z. B. durch die Kühlung, in der Kombination einer Fortluftbefeuchtung mit einem zweiten Wärmeaustauscher, abgeführt werden. Es gibt eine Vielzahl von denkbaren Schaltungen, die durch das von Heinrich [7] entwickelte messwertgestützte Berechnungsprogramm miteinander verglichen werden können.

Bei der mit wässrigen Salzlösungen arbeitenden Sorptionsentfeuchtung kann diese entstehende Wärme im Gegensatz zur trockenen Entfeuchtung durch eine Prozessinterne Kühlung abgeführt werden. Wie ein solcher mit wässrigen Salzlösungen betriebener Entfeuchter funktioniert und wie z. B. die Prozesswärme abgeführt werden kann, ist im Kapitel 9: „Versuchsaufbau“ eingehender beschrieben.

Vorteile der „flüssigen“ sorptiven Entfeuchtung:

- Zuluftpunkt kann direkt „angefahren“ werden (interne Prozesskühlung),
- zeitliche und örtliche Trennung der Regeneration von der Entfeuchtung,
- Einsatz von regenerativer Solarenergie bei der Regeneration,
- Einsatz der „konventionellen“ Kälteerzeugung bleibt auf die Kühlung auf Zulufttemperatur beschränkt (Betriebskostensparnis und verringerter Primärenergieeinsatz).

Nachteile der sorptiven Entfeuchtung:

- Aufwendige Prozessführung

Zur Vervollständigung des Kapitels der Sorptionstechnik sind im folgenden Abschnitt die Eigenschaften der am häufigsten zur Entfeuchtung verwendeten wässrigen Salze zusammengefasst aufgeführt.

7.2.2 Sorbentien

Für die Luftentfeuchtung werden Lösungen aus Kalziumchlorid, Lithiumchlorid oder das in [36] speziell entwickelte Klimat 3930 S¹ (im Folgendem als „Klimat“ bezeichnet) verwendet. Bei dieser Salzlösung handelt es sich um eine Zusammensetzung von:

- 39 Gew.-% CaCl_2 ,
- 18 Gew.-% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$,
- 5 Gew.-% Emulgator S und
- 38 Gew.-% Wasser

In dieser Arbeit wurde ausschließlich das Verhalten von Klimat untersucht, da es sich in den vorangegangenen Arbeiten [8], [36] und [37] als die geeignetste Absorptionslösung für die Entfeuchtung der Luft erwiesen hat. Die Stoffeigenschaften der am häufigsten verwendeten Sorptionsmittel sind für eine Bezugstemperatur von 20 °C in der nachfolgenden Tabelle aus der Arbeit von Kourouma [37] und Röben [8] zusammengestellt:

Bezugstemperatur $t=20^\circ\text{C}$ Umgebungsdruck [8];[37]	CaCl_2 -Lösung $\xi = 40$ Gew.-%	LiCl -Lösung $\xi = 40$ Gew.-%	Klimat 3930 S $\xi = 60$ Gew.-%
Dampfdruck [mbar]	9,274	4,000	4,060
Spez. Wärmekapazität [kJ/kgK]	2,570	2,603	2,167
Dyn. Viskosität [mPas]	9,39	9,66	320,35
Oberflächenspannung [mN/m]	90,25	90,58	96,55
Taupunkttemperatur [$^\circ\text{C}$]	5,87	-5,67	-5,48
Kristallisationsgrenze	50 Gew.-%	46 Gew.-%	62 Gew.-%
Dichte [kg/m^3]	1389	1254	1597

Tabelle 3: Stoffeigenschaften der am häufigsten verwendeten Sorptionsmittel [37]

¹ Klimat 3930 S, Hersteller Solvay Deutschland GmbH

8 Ergebnisse der Voruntersuchung

Um einen Versuchsaufbau, für einen mit wässriger Salzlösung arbeitenden Absorber, in seiner endgültigen Form errichten zu können, waren eine Reihe von Vorversuchen notwendig.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse aus diesen Vorversuchen sind im folgendem Kapitel beschrieben.

8.1 Verteilung des Sorbens

Die wässrige Salzlösung wird im Herzstück der Anlage, dem so genannten Absorber, in direkten Kontakt mit der vorbeiströmenden zu entfeuchtenden Luft gebracht. Um die Oberfläche der Lösung und damit die an der Absorption beteiligte Austauschfläche so groß wie möglich zu gestalten, muss die wässrige Salzlösung auf der gesamten Absorberoberfläche gleichmäßig verteilt werden. Je größer der Benetzungsgrad der Lösung auf der Absorberplatte und die damit verbundene absorptive Oberfläche, desto stärker wird der Anteil der entfeuchteten Luft.

Die Absorption des Wasserdampfes ist auf die Oberfläche der wässrigen Salzlösung beschränkt. Daher ist es sinnvoll, den entstehenden Solefilm so dünn wie möglich zu halten. Der Solestrom wird geringer und die damit verbundene Leistung der Pumpe wird reduziert.

8.1.1 Wissensstand über die Verteilung des Sorbens

In der Literatur [38] wird über die Verteilung von wässriger Klimatlösung mit Hilfe von Ultraschall-, Rotationszerteiler, Einstoffdruckdüsen und Zweistoffdruckdüsen berichtet. Ultraschallzerteiler sind für diesen Anwendungszweck durch den geringen Flüssigkeitsdurchsatz und die große Oberflächenspannung von Klimat ungeeignet. Experimentelle Untersuchungen wurden in [38] nur für die Einstoffdruckdüsen und die Zweistoffdruckdüsen durchgeführt.

Zusammengefasst lässt sich aus [38] folgern, dass sich die Verdüsung von Klimat und vergleichbaren hochviskosen Salzlösungen mittels Einstoffdruckdüsen und Zweistoffdruckdüsen zur absorptiven Luftentfeuchtung in einigen Punkten als problematisch erweist.

Die wichtigsten Punkte werden nachfolgend genannt:

- Klimat ist hochkorrosiv und hochviskos, so dass nur PVC-Rohre als Leitungen verwendet werden können. Der notwendige Düsenvordruck durch Einstoffdruckdüsen von 13 bar kann so nicht realisiert werden.
- Bei der Verwendung von Zweistoffdruckdüsen (pneumatischen Zerteilern) müsste aus hygienischen Gründen die verwendete Druckluft frei von Öl sein. Dies ist durch einen Umlaufkolbenverdichter zwar realisierbar; jedoch arbeitet dieser nicht so geräuschlos, wie es in der Klimatechnik wünschenswert ist.
- Durch die Verteilung der Sole mit Hilfe von Düsen können Aerosole entstehen, deren Korrosivität in Klimaanlage trotz geringer Giftigkeit der verwendeten Salze nicht unproblematisch ist.

Der zuletzt genannte Punkt zeigt, dass bei allen Arten von Verteilungen durch den direkten Kontakt der Sole mit der Zuluft auf einen Tropfenabscheider/Filter nicht völlig verzichtet werden sollte, um ein eventuelles Mitführen von Aerosolen in den Zuluftstrom zu vermeiden.

Röben [8] hat in seinem experimentellen Versuchsaufbau eine Verteilung aus Rohrleitungen mit Bohrungen von 0,5 mm und 0,6 mm Durchmesser verwendet [38]. Mit dieser Art der Verteilung konnten Austauschgrade von bis zu 60 % erreicht werden. Die mit Salz benetzte Austauschfläche betrug jedoch lediglich 25 % [38]. Im Endbericht zur Phase I des Forschungsvorhabens „Klimatisierung über Sorption“ [39] wird eine „bisektionale“ Verteilung erwähnt, deren detaillierte Beschreibung des Aufbaus durch das laufende Patentverfahren des „Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung“ e.V. Bayern (ZAE) jedoch ausbleibt. Die Idee der bisektionalen Verteilung, in der die Solezuführung mehrmals in zwei (bi) gleich lange Leitungen (Sektionen) halbiert wird, wurde aufgegriffen und in dieser Arbeit weiterentwickelt.

8.1.2 Bisektionale Verteilung

Die gleichmäßige geometrische Aufteilung des Stoffstromes in verzweigende Kanäle mit gleicher Querschnittsfläche und Länge, garantiert die beliebige weitere Auffächerung der Sole. In der Serienherstellung soll der Absorber, je nach geforderter Entfeuchtungsleistung, durch weitere zu benetzende Platten ergänzt werden, analog z. B. einem Plattenwärmeaustauscher. Daher erscheint es zweckmäßig, die Verteilung des Sorbens in dem Konstruktionsbauteil unterzubringen, das den Abstand zur nächsten entfeuchtenden Platte bewirkt. Diese Überlegung führte zu der

Entwicklung, die konstruktive Verteilung der wässrigen Salzlösung in einer Plexiglasschiene² als eine Art Abstandhalter zur nächsten Platte zu realisieren. Das Material Plexiglas wurde verwendet, da es für diesen Zweck folgende günstige Eigenschaften aufweist:

- Plexiglas ist korrosionsbeständig
- es lässt sich leicht bearbeiten

Außerdem besteht der geplante Absorber aus Plexiglas, so daß ein einheitlicher Materialverbund hergestellt werden kann.

Die Plexiglasschiene, die in der Abbildung 14 zu sehen ist, befindet sich im Versuchsaufbau (siehe Kapitel: „9 Versuchsaufbau“) oberhalb der zu benetzenden Absorberplatte. Diese in die Plexiglasschiene eingeprägten Kanäle bilden die eigentliche konstruktive Verteilung der wässrigen Salzlösung auf der Absorberplatte aus. Die genauen Maße der entwickelten Plexiglasverteilung können der technischen Zeichnung im Anhang dem Kapitel 16.1 entnommen werden.

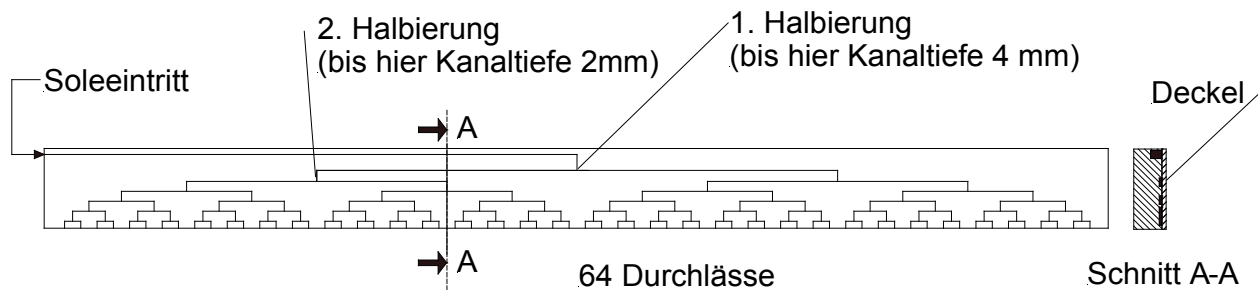


Abbildung 14: Bisektionale Verteilung eingepragt in eine Plexiglasschiene 2

Der Soleeintrittskanal in der Abbildung 14 wird von der linken oberen Seite der Plexiglasschiene bis zu deren Mitte geführt, dann senkrecht umgelenkt, halbiert und waagrecht in Richtung der Außenseiten der Schiene mittig zurückgeführt. Diese Halbierung wird fünfmal fortgesetzt bis 64 Durchlässe in einem Abstand von 7,5 mm zueinander entstanden sind. Die Kanäle haben eine Breite von 3 mm. In Vorversuchen wurde festgestellt, dass sich das aus der Plexiglasschiene austretende Tropfenbild von Klimat bei der Erweiterung der Kanäle von 1 mm auf 3 mm unwesentlich ändert.

Dies hat den Vorteil, dass durch die kleinen Kanäle kein zusätzlicher Druck durch die Pumpe überwunden werden muss. Der erste Kanal entspricht in seiner Tiefe von

² Plexiglas = reg. Marke der Röhm GmbH, Darmstadt

4 mm der Querschnittsfläche der Zuleitung der Sole zur Plexiglasschiene. Durch die große Viskosität von Klimat ist für dessen Förderung durch eine Pumpe eine große Druckdifferenz notwendig. Dieser Druck kann durch die im Kapitel: „9.1 Anlagenschema“ gezeigte Membranpumpe aufgebracht werden. Der Druck der Solepumpe und die durch die Membran bedingte pulsierende Förderung wird durch die Reduzierung auf gleiche Querschnittsflächen der Kanäle über die Plexiglasschiene gleichmäßig abgebaut. Damit ist eine stetige und kontinuierliche Förderung von Klimat gewährleistet.

Nach der ersten Trennung des Stoffstromes wird auch die Tiefe der Kanäle von 4 mm auf 2 mm reduziert. Alle nachfolgenden Kanäle in der Plexiglasschiene sind 1 mm tief. Die Lage und Tiefe der einzelnen Kanäle ist in der Abbildung 14 im Schnitt dargestellt. Um Einblick in den Absorber während des Betriebes zu gewähren, wurden dieser mit einer transparente Abdeckung versehen. Der Abstand, den diese Abdeckung zur absorbierenden Schicht aufweist, ist der gleiche, den eine nachfolgende Absorberplatte hätte, die notwendig wäre, um eine eventuell geforderte größere Entfeuchtungsleistung zu erreichen. Diese Abdeckung aus Plexiglas ist Bestandteil der Zuluftführung und konnte so nicht zusätzlich zur Abdichtung der Plexiglasschiene verwendet werden (siehe Abbildung 27). Die Plexiglasschiene wurde deshalb mit einem 1,5 mm starken Deckel vollständig verschlossen (Abbildung 14). Dieser Deckel kann bei einem aus mehreren Platten bestehenden Absorber konstruktiv entfallen, da die nächste parallele Absorberplatte den Deckel der Plexiglasschiene ausbildet. Verschiedene Testreihen, in denen die Verteilung mit unterschiedlichen Volumenströmen von Klimat beaufschlagt wurde, zeigten, dass doppelseitiges transparentes Klebeband mit Trägermaterial (von 0,1 mm Stärke) dem sich in der Plexiglasschiene abbauenden Druck am besten standhielt. Eine zweite Variante zum Verschließen der Plexiglasverteilung ist die adhäsive Verklebung des Deckels. Bei dieser Art der Verklebung wurden die Kanäle zunächst mit Wachs verschlossen, um sie vor dem Klebstoff zu schützen. Es stellte sich heraus, dass dessen Entfernung und das Säubern nach der Aushärtung der Verklebung zu zeitaufwendig ist, um bei der geplanten Serienherstellung Verwendung zu finden. Eine unzureichend gesäuberte Plexiglasschiene birgt außerdem die Gefahr, das verbleibende Wachsreste den sich gleichmäßig aufteilenden Strom der wässrigen Salzlösung behindern.

8.1.2.1 Konstruktive Fertigung

Bei der Fertigung der 1 mm tiefen Kanäle in die Plexiglasschiene ist unbedingt auf die Einhaltung der Toleranzen zu achten, da sich die Toleranzen auch in der Verteilung der Durchflussmengen der Sole widerspiegeln. Die gemessenen und in der Abbildung 15 aufgetragenen unterschiedlichen Tiefen der Austrittskanäle sind durch das Einspannen der Plexiglasplatte für die Durchführung der Fräsarbeiten hervorgerufen worden. Es ist zweckmäßig, die Plexiglasplatte nach dem Einspannen zunächst plan zu fräsen, bevor die Kanäle eingeschnitten werden. Dies ist bei der Herstellung der Plexiglasschienen III und IV berücksichtigt worden. Es wurden insgesamt 4 Plexiglasschienen in der Originalgröße hergestellt, bis der fast horizontale Tiefenverlauf der Durchlässe der Plexiglasschienen III und IV in der Abbildung 15 erreicht werden konnte. Die Abbildung 15 stellt eine Art Fertigungskontrolle der Tiefen der eingefrästen Kanäle dar. Wie schwer es ist eine gleichmäßige Tiefe der Kanäle in der Plexiglasschiene herzustellen, ist aus der Abbildung 15 zu erkennen: nur die Plexiglasschienen III und IV sind für einen Versuchsstand verwendbar.

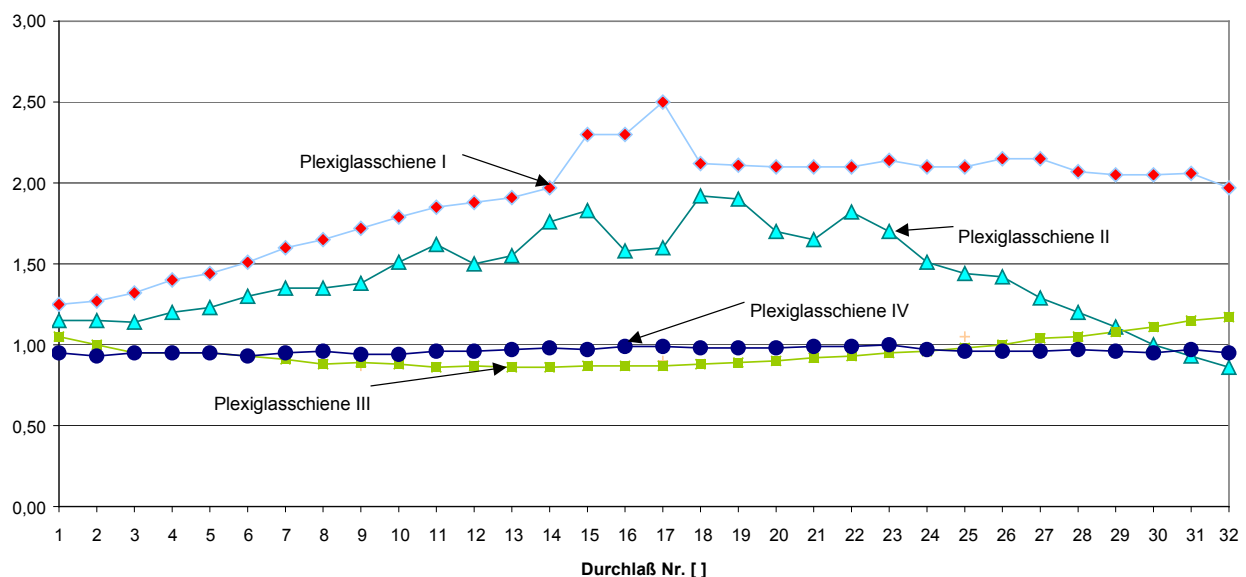


Abbildung 15: Fertigungskontrolle der Tiefen der Kanäle im Bereich der Durchlässe

8.1.2.2 Durchflußverteilung

Um die Gleichmäßigkeit der Durchströmung der bisektionalen Verteilung mit Klimat zu überprüfen, wurde das aus den 64 Kanälen austretende Klimat jeweils paarweise in 32 skalierten Reagenzgläsern aufgefangen. Der Zeitraum in dem das Klimat in den Reagenzgläsern aufgefangen wurde betrug für die Plexiglasschiene I 8 Minuten und für die Plexiglasschienen III bis IV 5 Minuten. Die Förderleistung der Pumpe wurde auf 8-12 % der Maximalleistung eingestellt. In der Abbildung 16 sind die in diesem Zeitintervall gemessenen Durchflussmengen der Plexiglasschienen I bis IV aufgetragen. Die Plexiglasschienen I und II, deren Durchflussmenge nicht gleichmäßig verteilt ist, wurden, wie bereits beschrieben, adhäsiv verklebt. Es ist bei diesen verklebten Schienen nicht gelungen, die Wachsreste vollständig zu entfernen, so dass einzelne Kanäle durch Wachsreste verengt waren. Die Plexiglasschiene III (ohne Trägermaterial) und Plexiglasschiene IV (mit Trägermaterial) sind mit doppelseitigem Klebeband mit einem Deckel verschlossen worden. Für die Plexiglasschiene IV, die in den weiteren Versuchen verwendet wurde, ist der gewünschte horizontale Verlauf der Trendlinie zu erkennen. Die Trendlinie verläuft parallel zur Achse im Bereich der aufgefangenen Menge von 2 ml.

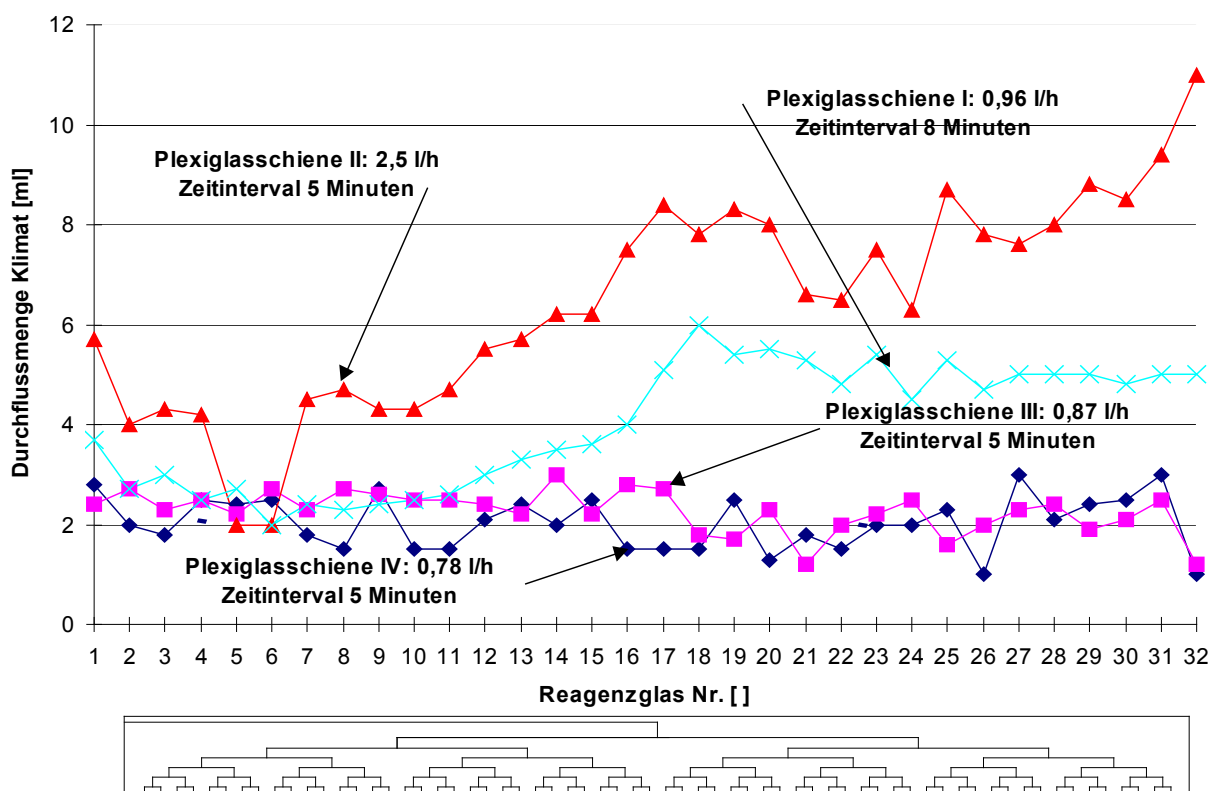


Abbildung 16: Verteilung der Durchflussmenge der Plexiglasschienen I bis IV

Die Plexiglasschienen I und II, die Fertigungsfehler im Bereich der Tiefen der eingefrästen Kanäle aufwiesen, wurden bei den in diesem Kapitel gemachten Versuchen zusätzlich untersucht. Dieser Ausschuß der Plexiglasschienen (I; II) wurde weiter untersucht, um zu klären, inwieweit sich Fehler in der Fertigungstiefe der Kanäle sich auf die Durchflußmenge überhaupt auswirkt und in der praktischen Fertigung zu berücksichtigen ist. Wie deutlich in der Abbildung 16 zu entnehmen ist, muß diese Art der Verteilung präzise gefertigt werden, da ansonsten die Durchflußmengen der Sole um mehr als das Dreifache variieren können.

8.1.2.3 Durchflussmenge

Um festzustellen, ob die Verteilung der Durchflussmenge von dem Volumenstrom der Solelösung abhängig ist, wurde die Plexiglasschiene I mit unterschiedlichem Pumpendruck getestet. Die Plexiglasschiene I wurde für diesen Versuch extra ausgewählt, da diese nach der unzureichenden Säuberung der Kanäle noch Wachsreste aufwies (vgl.: Seite 39). Dieser Fertigungsausschuß wurde weiter untersucht, um heraus zu finden, ob sich unterschiedliche Durchflußmengen entstanden durch genannte Fertigungsfehler Mithilfe von größeren Volumenströmen korrigieren lassen. Die Förderleistung der Pumpe wurde für diese Versuchsreihe auf 40 % und bei den Volumenströmen von 2,6 l/min und 3 l/min sogar auf 50 % der maximalen Förderleistung eingestellt. Bei diesen Fördermengen wurde das Zeitintervall indem das Klimat aufgefangen wurde bei dem Volumenstrom von 1,2 l/min auf 10 Sekunden, bei dem Volumenstrom von 2,6 l/min auf 5 Sekunden und bei dem Volumenstrom von 3 l/min auf 5 Sekunden reduziert. In der Abbildung 17 sind die Mengenverteilung der gemessenen Volumenströme der Plexiglasschienen I sehen. Es stellte sich heraus, dass selbst bei größeren Volumenströmen von 2,5 l/h sich die Verteilung der Durchflußmenge nicht änderte. Die deutlich geringere aufgefangene Menge Klimat im Reagenzglas Nr. 17 in der Mitte der Plexiglasschiene ist durch die sich dort befindlichen Wachsreste zu erklären. Der parallele Verlauf bei unterschiedlichen Volumenströmen ist gerade im Bereich der Verengung durch die Wachsreste gut zu erkennen.

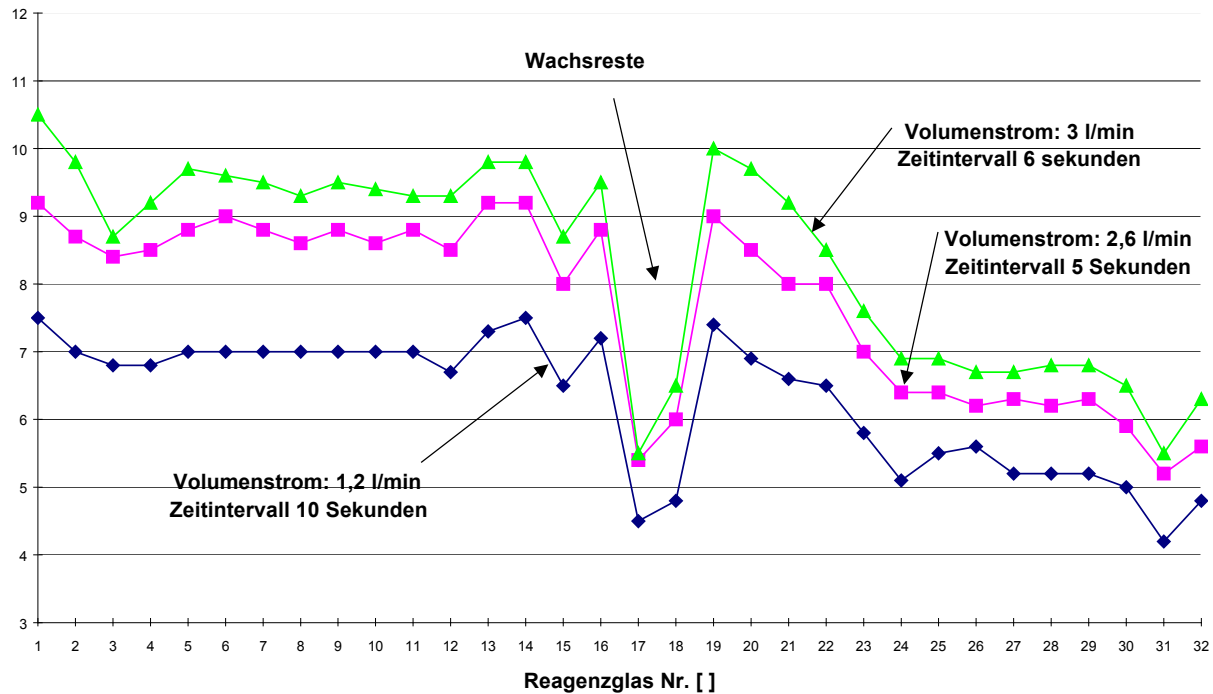


Abbildung 17: Durchflußmenge der Verteilung I bei verschiedenen Volumenströmen

Zusammengefasst ist es unabhängig von der Durchflussmenge mit dieser Art der bisektionalen Aufteilung der Kanäle gelungen, eine gleichmäßige Verteilung der verwendeten wässrigen Salzlösung (Klimat) sicherzustellen. Dazu müssen die Toleranzen beim Einfräsen der Kanäle in der Plexiglasschiene eingehalten werden. Es erscheint zweckmäßig, diese Art der Verteilung mit doppelseitigem -mit Trägermaterial versehenen- Klebeband zu dichten, wenn dies konstruktiv notwendig ist. Durch die kompakte Bauweise kann die Verteilung leicht in einen Plattenabsorber integriert werden.

8.2 Oberfläche des Absorbers

Durch die korrosiven Eigenschaften der zur Entfeuchtung verwendeten wässrigen Salzlösung aus Klimat, kommen für die Bauteile, die unmittelbar mit dem Sorbens in Berührung kommen, nur nicht-korrosive Materialien wie z. B. Kunststoffe in Betracht. Kunststoffe haben eine niedrige Festkörper-Oberflächenspannung und sind infolgedessen durch Wasser bzw. wässrige Lösungen nur schwer zu benetzen. Die Kunststoffe, wie z. B. Polyvinylchlorid, Polymethacrylate (Trivialname: Acrylglas oder Plexiglas³) und Polykarbonate (Trivialname: Makrolon⁴), haben selbst keine oder vernachlässigbar wenige polare Gruppen in ihrer Struktur, wodurch die von sich aus wasserabstoßenden Eigenschaften zu erklären sind. Kunststoffe werden als wasserabstoßend bezeichnet, wenn der Randwinkel eines darauf liegenden Wassertropfens mehr als 70° beträgt [40]. Als Randwinkel wird der Winkel zwischen der benetzten Oberfläche und der Tangente an die Oberfläche des Wassertropfens mit der Berührungsstelle mit der Oberfläche verstanden [40]. In der Abbildung 18 ist der sich ergebende Randwinkel, für schlecht (links) bis gut (rechts) zu benetzende Oberflächen, schematisch dargestellt. Der entstehende Randwinkel eines Wassertropfens auf der Oberfläche einer waagerecht liegenden, unbeschichteten Platte aus Polykarbonat beträgt 75° . Tropfen mit einem Randwinkel von 75° sind nahezu halbkugelförmig.

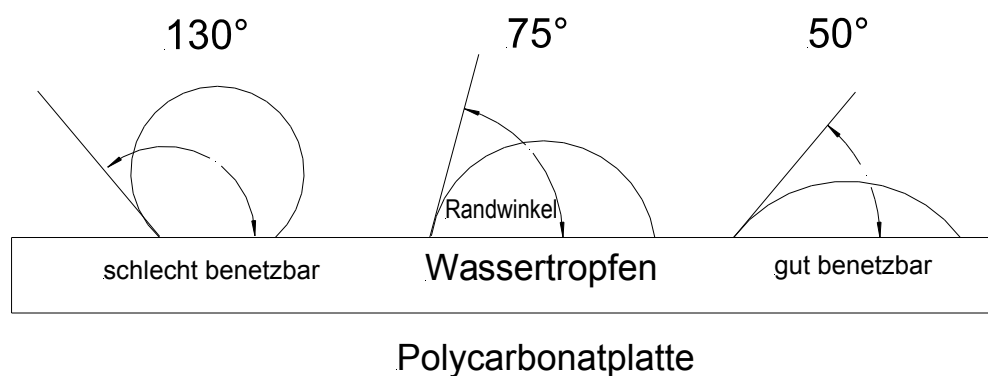


Abbildung 18: Definition der Benetzung durch den Randwinkel eines Tropfens auf einer Polycarbonatplatte

³ Plexiglas = reg. Marke der Röhm GmbH, Darmstadt

⁴ Makrolon = reg. Marke der Bayer AG, Leverkusen

Es sind zwei Möglichkeiten in dieser Arbeit untersucht worden, um den Benetzungsgrad der Absorberoberfläche zu optimieren. Zwei Absorber, die in ihren Abmaßen gleich waren, sind mit unterschiedlichen Oberflächen versehen worden, um ihre Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit zu testen. Die beiden Absorber mit ihren unterschiedlichen Oberflächen werden nachfolgend beschrieben:

- 1) Der Absorber I ist wie in der Arbeit von Röben [8] mit einem Vlies versehen worden. Das eingesetzte Vlies ist etwas stärker als das von Röben verwendete und mit einer wabenartigen Struktur versehen. Dieses Vlies wurde mit einem LötKolben in senkrechten Bahnen auf der Polypropylenoberfläche festgeschweißt. Die wabenförmige Oberfläche des verwendeten Vlieses ist in der vergrößerten Draufsicht der beiden Klimattropfen in der Abbildung 19 zu sehen. Links der Tropfen auf der Wabenvliesoberfläche, rechts der Tropfen auf der von Röben [8] verwendeten Beschichtung. Die Tropfenmenge und der entstehende Randwinkel unterscheiden sich nicht sichtbar, so dass von gleichen Benetzungseigenschaften ausgegangen werden kann.
- 2) Der Absorber II besteht aus einer reinen Polykarbonatplatte, die auf der einen Seite mit einer wasserspreitenden Schicht versehen ist. Die Firma Röhm GmbH ist Inhaber des Europapatentes [41] für diese wasserspreitende Beschichtung. Diese Beschichtung, entwickelt von Krautter und Dzialis [41], ist ursprünglich für die Verwendung von Verglasungs- und Bedachungsmaterial erdacht worden, um die Lichtdurchlässigkeit bei Tropfenbildung zu verbessern.

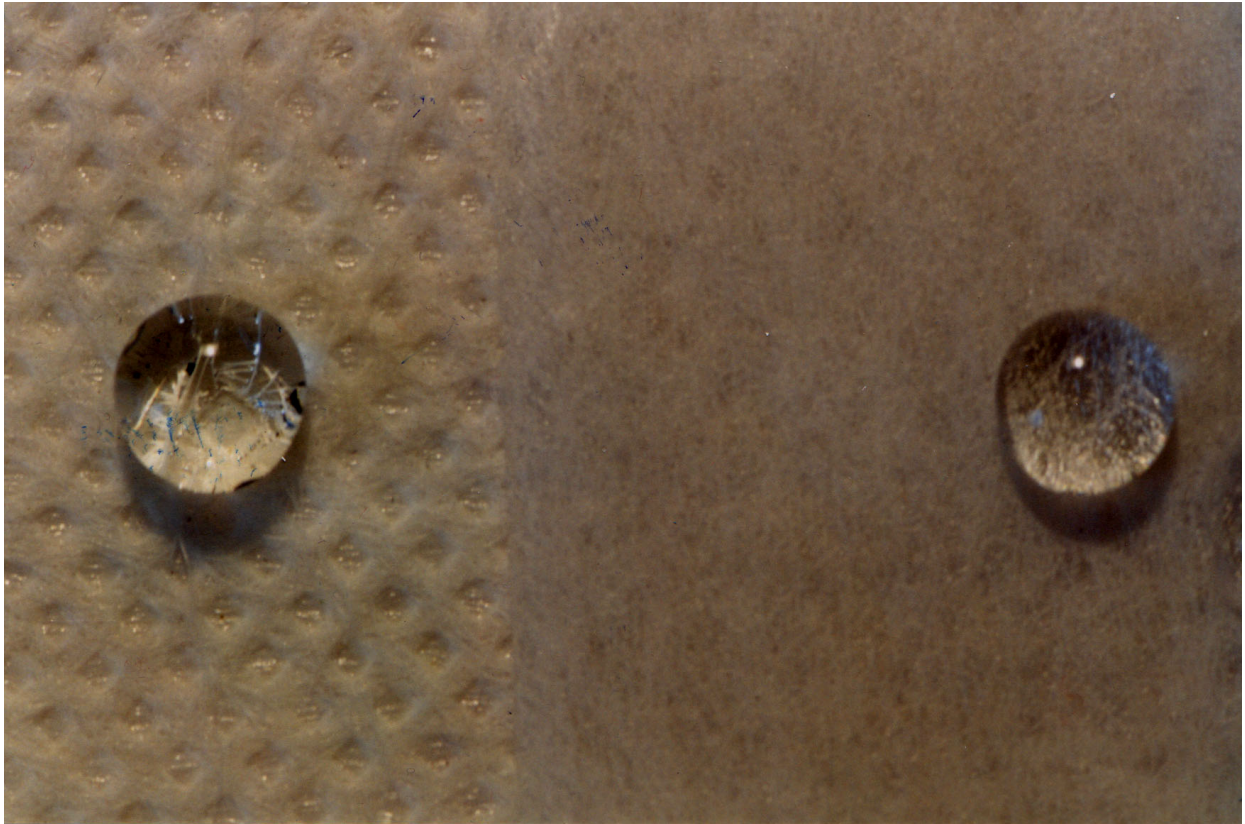


Abbildung 19: Fotografische Draufsicht zweier Klimattropfen. Links „Wabenvliesoberfläche“, rechts das in der Arbeit von Röben [8] verwendete Vlies.

Da außer in dieser Arbeit keine weiteren Versuche mit der wasserspreitenden Beschichtung in Kombination mit Klimat vorliegen, wird die Art und Funktionsweise, sowie deren Aufbau aus der Patentschrift [41] zusammengefasst erläutert:

Zwischen der wasserspreitenden Schicht und der wasserabstoßenden Kunststoffoberfläche befindet sich eine haftvermittelnde Schicht. Die wesentliche Eigenschaft der haftvermittelnden Schicht ist, dass sie eine größere Haftfestigkeit sowohl zu der Kunststoffoberfläche als auch zu der wasserspreitenden Schicht besitzt, als die wasserspreitende Schicht zu der Kunststoffoberfläche alleine. Die Haftung der „Zwischenschicht“ mit der wasserspreitenden Schicht beruht auf den polaren Gruppen in der haftvermittelnden Schicht in Verbindung mit ihrer Unlöslichkeit und Unquellbarkeit in Wasser. Die haftvermittelnde Schicht kann laut [41] z. B. aus einer 2,5-prozentigen Lösung eines Mischpolymerisates aus 87,6 Gew.-% Methylmethacrylat und 12,4 Gew.-% γ -Methacryloxypropyl-trimethoxysilan bestehen. Die haftvermittelnde Wirkung kommt an beiden Grenzflächen schon durch eine Schicht der Dicke von vorzugsweise 0,01 bis 2 μm zustande. Geringere Dicken sind nur schwer ohne Fehlstellen zu erzeugen. Größere Dicken sind weniger wirtschaftlich aber technisch voll wirksam.

Als wasserspreitende Schicht eignen sich neben den reinen Oxiden wie Siliciumdioxid und Aluminiumoxid auch Oxid-Gemische. Die Oxidschicht übt eine starke wasserspreitende Wirkung aus, die laut der Patentschrift [41] anscheinend auf die gute Wasserbenetzbarkeit der Oxide, als auch auf die submikroskopische Rauigkeit der Oxidschicht zurückzuführen ist. Für die Wirksamkeit der Schicht ist nur deren geschlossene Oberfläche, nicht aber deren Dicke wichtig. Daher wird eine Schichtdicke von 0,01 bis 4 μm , insbesondere 0,1 bis 1 μm bevorzugt. Die Abriebfestigkeit und Haftung können laut der Patentschrift [41] durch die Erwärmung auf über 80 °C nochmals verbessert werden. Diese Temperaturen sind auch zum „Spannungsfrei-Tempeln“ für die Polykarbonatplatten nach einer spannenden Bearbeitung, wie z. B. dem Einfräsen der die Salzlösung verteilenden Kanäle ohnehin notwendig [42].

Zur Bewertung verschiedener Verglasungsmaterialien gehört als wesentliche Eigenschaft die Dauerhaftigkeit bzw. mechanische Empfindlichkeit im Nasszustand. Die genannte Beschichtung wurde, wie in [41] beschrieben, der Nassscheuerbeanspruchung gemäß DIN 53778 unterworfen und die Zahl der Scheuerhübe festgestellt, die zu einer deutlichen Minderung der Wasserspreitfähigkeit führen. Festgestellt wurde, dass der Randwinkel eines auf die Beschichtung aufgetragenen Wassertropfens kleiner als 10° ist und die Beschichtung nach 20.000 Scheuerhüben noch voll wirksam ist. Wichtig zu betonen ist, dass die Dauerhaftigkeit dieser Beschichtung mit Wasser gewährleistet ist, gesicherte Erkenntnisse über eine Abnutzung des eingesetzten Sorbens (Klimat) jedoch nicht vorliegen. Die Zeit zur Durchführung der Versuche des mit der wasserspreitenden Schicht versehenen Absorbers betrug vier Monate, ohne dass Abnutzungserscheinungen sichtbar wurden. In der nachfolgenden Abbildung 20 sind die entstehenden Randwinkel eines Tropfens aus einer 58 % wässrigen Klimatlösung auf einer Polypropylenoberfläche (links) und einer Polykarbonatoberfläche (rechts) mit der wasserspreitenden Beschichtung im Rahmen der Vorversuche fotografisch festgehalten worden. Der Randwinkel von 108 ° lässt bei der Polypropylenoberfläche laut Definition auf einen schlechten Benetzungsgrad, bei der wasserspreitenden beschichteten Polykarbonatplatte (42 °) auf einen guten Benetzungsgrad schließen.

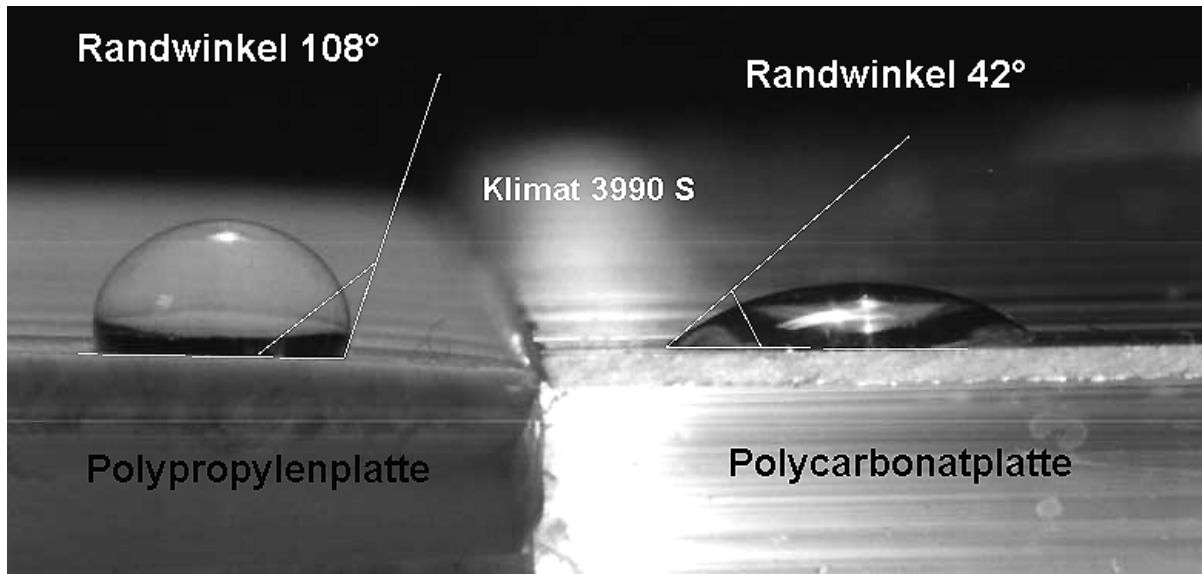


Abbildung 20: Der entstehende Randwinkel eines Tropfens von einer 58 % Klimat 3990 S Lösung auf der Polypropylenplatte und der mit einer wasserspreitenden Beschichtung versehenen Polycarbonatplatte

Der Absorber I (vgl.: S. 43, 8.2 Oberfläche des Absorbers) ist mit einem Vlies versehen worden, dass in der Abbildung 20 auf der Polypropylenplatte (links) nicht verwendet wurde. Der Randwinkel gleicht optisch dem Randwinkel auf der Vliesoberfläche (Abbildung 19), darum konnte in der fotografischen Aufnahme auf die zusätzliche Schicht verzichtet werden.

Um den Benetzungsgrad der gesamten Absorberfläche zu verdeutlichen, wurde die Absorberplatte ohne die angeschlossene Luftführung und deren Isolation mit Sole fotografiert. Abbildung 21 zeigt die mit einem Vlies versehene Polypropylenoberfläche mit der ablaufenden Sole Klimat. Um einen besseren Kontrast zu erhalten, wurde die transparente Sole mit einem Farbstoff versetzt.

Am oberen Rand des Bildes sieht man die Tropfen, die gerade aus der bisektionalen Verteilung austreten. Die erkennbaren vertikalen Bahnen sind die Befestigungsnähte des Vlieses auf der Polypropylenoberfläche. Entgegen der bisherigen Annahme kann eine vollständige Benetzung der verwendeten Vliese nicht gewährleistet werden. Es bilden sich Rinnsale aus, wie deutlich in der Abbildung 21 zu sehen ist. Die verwendeten Vliese lassen sich nicht vollständig tränken. Der Einsatz von Papiervliesen (z. B. Löschpapier), die sich besser tränken ließen, wurde durch die begrenzte Haltbarkeit von Zellulose im feuchten Zustand nicht untersucht.

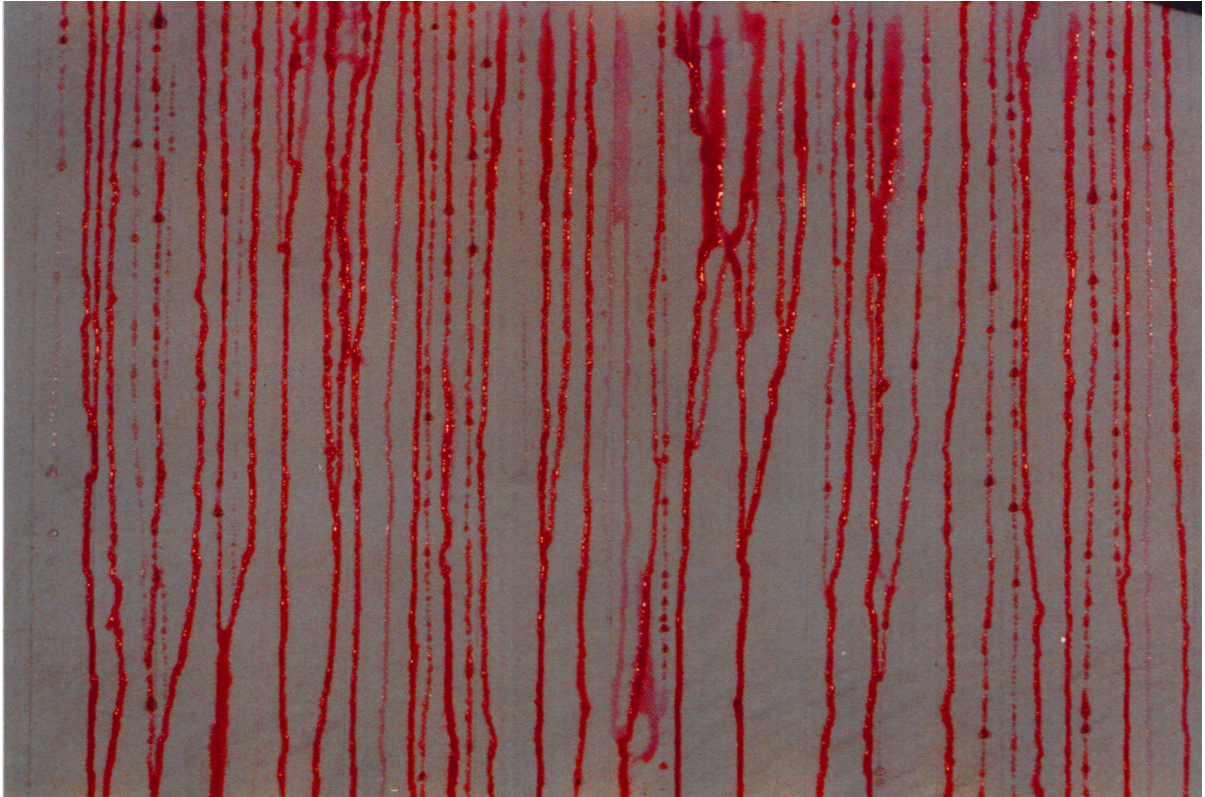


Abbildung 21: Polypropylenoberfläche (Vlies) mit ablaufender eingefärbter Sole. Der Benetzungsgrad der Oberfläche beträgt 21,5 % der maximal zu benetzenden Oberfläche.

Der sichtbare Benetzungsgrad wurde optisch ausgewertet. Für diese Auswertung wird die Abbildung mit einem Raster aus 4004 Punkten überzogen und anschließend die mit Sole versehenen „Kästchen“ ausgezählt und die Fläche ermittelt. Der mit dieser Methode bestimmte Benetzungsgrad liegt bei 21,5 %. Das heißt, dass gerade ein 1/5 der zu benetzenden Oberfläche mit der Sole überzogen ist! Der Benetzungsgrad ist wie folgt definiert:

$$b_g = \frac{A_{Fb} \times 100}{A_F} \quad \text{Gleichung 11}$$

Mit: b_g = Benetzungsgrad [%]
 A_{Fb} = benetzte Absorberfläche [m²]
 A_F = Absorberfläche [m²]

Die Abbildung 22 zeigt die sich verteilende Sole auf der Polykarbonatoberfläche mit der wasserspreitenden Beschichtung. Die sichtbar gleichmäßigen vertikalen Linien sind die sich innerhalb der Platte befindlichen Stege der Stegdoppelplatte. Durch die Transparenz der Platte sind die breiteren Bahnen der Sole gerade noch zu erkennen. Um den Kontrast zu erhöhen, wurde hinter die Platte eine weiße Folie gelegt.

Der Benetzungsgrad wurde abermals mit dem soeben beschriebenen Verfahren bestimmt. Die Steigerung des Benetzungsgrades beträgt 12 % Punkte. Das heißt, das 33 % der Absorberoberfläche mit der Sole benetzt wurde.

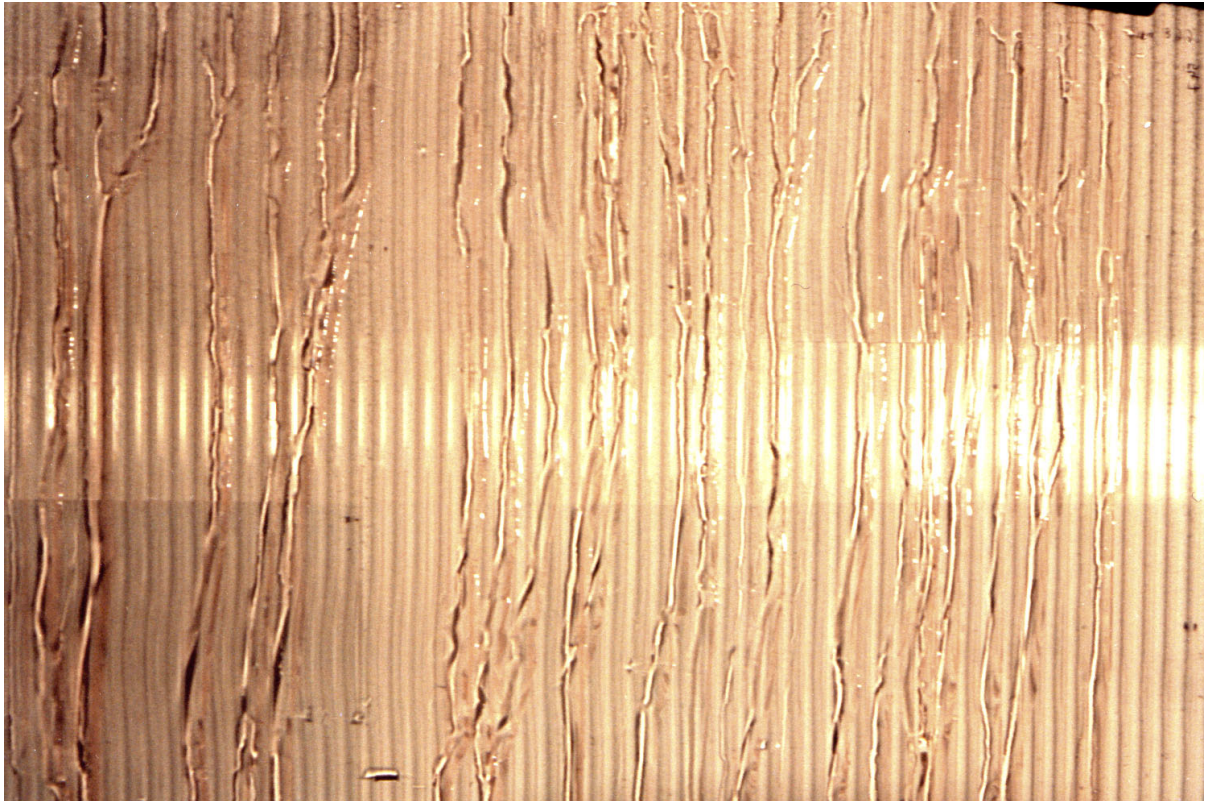


Abbildung 22: Benetzungsgrad der Sole auf der Polykarbonatoberfläche. Der Benetzungsgrad der Oberfläche beträgt 33 % der maximal zu benetzenden Oberfläche

Um den Benetzungsgrad weiter zu erhöhen, wurden die ablaufenden Bahnen sowohl einerseits auf dem Vlies, andererseits auf der wasserspreitenden Polykarbonatoberfläche einmalig manuell verwischt und die ablaufenden Rinnsale dadurch gleichmäßig über die Platte verteilt. Bei der mit dem Vlies versehenen Oberfläche stellen sich nach kürzester Zeit wieder die in der Abbildung 21 ersichtlichen Rinnsale ein. Bei der wasserspreitenden Polykarbonatoberfläche „NO DROP⁵“ bleibt dieser Film bestehen. Auf der nachfolgenden Abbildung 23 ist die manuell verwischte Sole auf der beschichteten Polykarbonatoberfläche durch den geringen Kontrast gerade noch zu erkennen. Obwohl bei dieser Aufnahme das eingefärbte Klimat verwendet wurde, ist durch den entstandenen dünnen transparenten Film kaum ein Kontrast sichtbar. Am oberen Rand der Abbildung sind die zu einem geschlossenen Film zusammenlaufenden Bahnen der Sole zu erkennen.

⁵ Warenbezeichnung der wasserspreitenden Beschichtung der Firma Röhm GmbH

Der Benetzungsgrad, der bei der verwischten Polykarbonatoberfläche optisch bei ~99 % liegt, bleibt bis zum Abschalten des Solestromes bestehen.

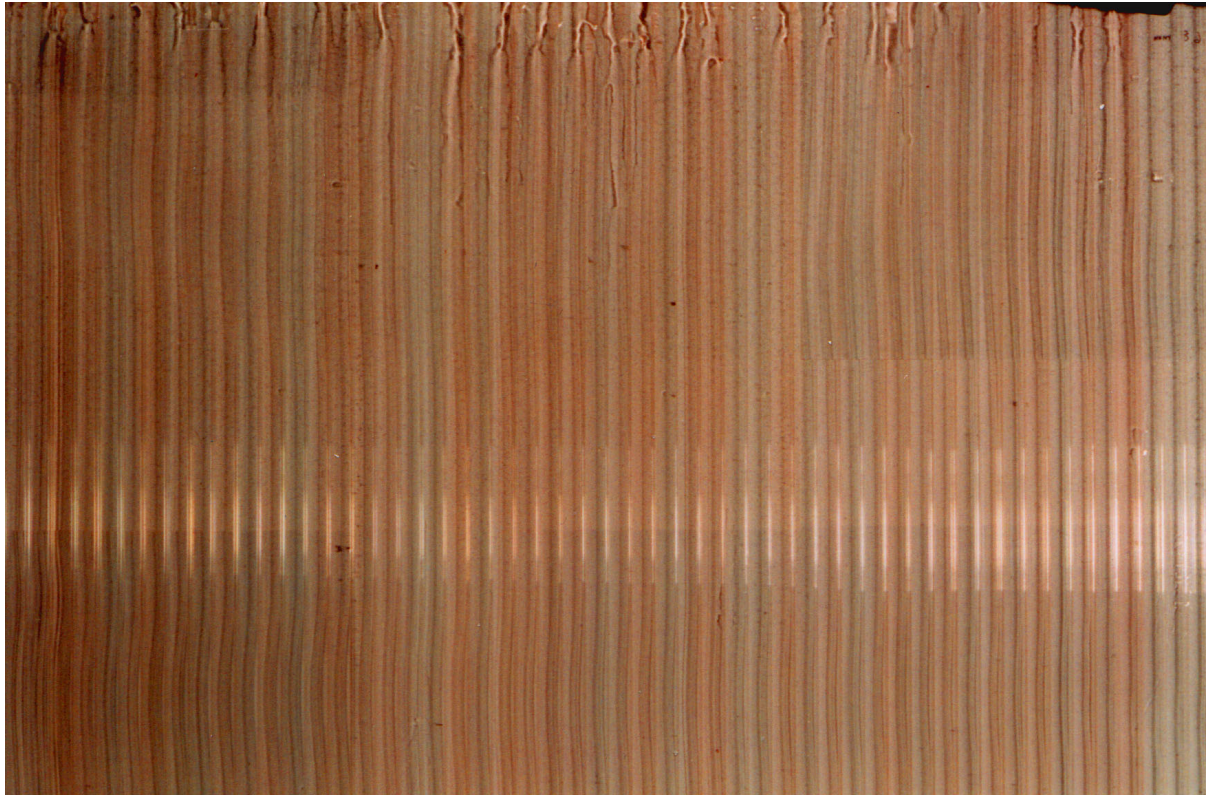


Abbildung 23: die manuell verwischte Sole auf der Polykarbonatoberfläche. Ein nahezu vollständiger Benetzungsgrad wird erreicht.

Die einmalig vollständig benetzte Oberfläche garantiert einen maximal zu erreichenden Benetzungsgrad und ist konstruktiv in der Praxis unbedingt zu realisieren. Durch die Kombination der bisektionalen Verteilung in der Plexiglasschiene mit der wasserspreitenden Beschichtung ist ein fast vollständiger Benetzungsgrad erreicht. Dieser Benetzungsgrad wird möglich, wenn zu Beginn der Entfeuchtung die Sole auf der Absorberoberfläche entweder einmalig maschinell verwischt wird oder der Absorber z. B. vor der Entfeuchtung zunächst mit der wässrigen Salzlösung geflutet wird. Nach dem Verwischen bzw. dem Fluten bleibt der Solefilm bis zum Abschalten des Solestromes dann bestehen. Diese konstruktive Umsetzung der vollständigen Benetzung ist bei dem in Kapitel: 9.5 vermessenen Absorber während der Versuchsreihen nicht sichtbar gelungen, da die Platte zwecks der gleichen Versuchsbedingungen vollständig wärmegeklämt wurde und ein Einblick oder Zugriff nicht mehr möglich war. Außerdem ließ die am Versuchsstand installierte Messtechnik kein Fluten des Absorbers zu, ohne dabei Schaden zu

nehmen.

In nachfolgender Tabelle sind die erreichten Benetzungsgrade (b_g) der Sole Klimat mit den verwendeten Oberflächen zusammengefasst:

Oberfläche	Benetzungsgrad b_g [%]
Polypropylenoberfläche mit „Wabenvlies“	21,5
Polykarbonatoberfläche „NO DROP“	33
Polykarbonatoberfläche „NO DROP“, verwischt	~ 99

Tabelle 4: Ergebnisse des erreichbaren Benetzungsgrades b_g [%] mit Klimat und der untersuchten Oberflächen

Der Vorteil, der sich hinsichtlich des Benetzungsgrades der Polykarbonatoberfläche ohne den Einsatz eines Vlieses ergibt, wird durch den praktischen Anwendungsfall verstärkt:

Bei einer eventuellen Reinigung des Absorbers muss bei Verzicht auf die dünne Vliesoberfläche dieser keine besondere Beachtung geschenkt werden, da die Polykarbonatoberfläche mit weniger Aufwand durch einen Hochdruckreiniger gesäubert werden könnte.

Zusammengefasst wurde konstruktiv die Verteilung und der Benetzungsgrad des Absorbers mit der wässrigen Salzlösung (Klimat) durch folgende Punkte verbessert:

- Bisektionale Kanäle zur Verteilung des Sorbens Klimat,
- gleichbleibende Verteilung, unabhängig der geförderten Solemenge,
- kompakte Bauweise der Verteilung zum Betrieb von parallelen Absorberplatten,
- wasserspreitende Kunststoffoberfläche „NO DROP“ ist für Klimat einsetzbar
- Benetzungsgrade der Absorberplatte von ~ 99% werden erreicht

Voraussetzung für die erreichte maximale aktive Entfeuchtungsfläche ist die konstruktive Umsetzung der einmaligen vollständigen Benetzung, z. B. durch Fluten der Anlage mit Sole oder die konstruktive Einbindung eines Wischers.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden Konzentrationsmessungen der Sole durch zwei unterschiedliche im folgenden Kapitel 8.3 beschriebene Messverfahren durchgeführt, um die Abnahme der Salinität während der Versuche am Absorber überprüfen zu können.

8.3 Konzentrationsmessung der Sole

Die Konzentration der eingesetzten Sole ist der wichtigste zu überwachende Parameter in einer mit wässriger Salzlösungen betriebenen Entfeuchtungsanlage, da die Abnahme der Salinität Aufschluß über die Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft gibt. Je stärker die Solekonzentration durch die Verdünnung des in der feuchten Luft enthaltenen Wassers sinkt, desto geringer wird auch das die Entfeuchtung beeinflussende Partialdruckgefälle. Daher ist es wichtig, die Konzentration der Sole überwachen zu können, um sie der Regeneration zuzuführen, wenn die geforderte Entfeuchtungsbreite nicht mehr gewährleistet ist. Die Konzentrationsmessung kann einerseits über die Dichte (Biegeschwingermethode) oder über die elektrische Leitfähigkeit erfolgen. Die Messung der Konzentration über die Dichte ist durch die vorgegebenen Randparameter des Biegeschwingers exakter, jedoch stellt die Messung der Konzentration über die Leitfähigkeit eine für die Praxis hinreichend genaue Messmethode dar, um die Wasserzunahme der Solekonzentration im Entfeuchtungsbetrieb bzw. deren Feuchtigkeitsabnahme im Regenerationsbetrieb zu überwachen und damit zu regeln. Die im Rahmen dieser Arbeit am Absorber gemessenen Konzentrationen wurden bedingt durch die größere Genauigkeit im Labor durch die Biegeschwingermethode bestimmt. Der Vorteil der Messung der Konzentration über die Leitfähigkeit ist, diese Messung direkt im Solestrom durchführen zu können, ohne erst Proben der Salzlösung entnehmen zu müssen. Um von der Leitfähigkeit auf die Konzentration der wässrigen Klimatlösung rück schließen zu können, war es notwendig, die Leitfähigkeit von bereits bekannten Solekonzentrationen zu messen. Die Konzentrationen der im nächsten Kapitel verwendeten fünf Proben sind durch die Schwingzeiten der Biegeschwingermethode berechnet worden.

Im Folgenden werden beide Methoden der Messung der Konzentrationen vorgestellt.

8.3.1 Konzentrationsmessung über die Dichte

Bei der Bestimmung der Volumendichte der Masse von Flüssigkeiten und Gasen wird diese auf eine elektronische Messung der Schwingdauer eines mit dem Medium gefüllten Rohres zurückgeführt. Beim verwendeten Dichtemesser DMA 45 [43] wurde die zu messende Substanz in ein schwingfähiges, U-förmig gebogenes, gläsernes Rohr gefüllt. Die Eigenfrequenz dieses Rohres wird von der Masse des Präparates beeinflusst. Aus der Eigenfrequenz des schwingenden Gebildes kann auf die Dichte des Präparates geschlossen werden.

Die Eigenfrequenz berechnet sich nach folgendem Zusammenhang:

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c}{M_{\text{Schw}} + \rho_{\text{Pro}} V_{\text{Schw}}}} \quad \text{Gleichung 12}$$

Mit: f = Eigenfrequenz [1/s]
 c = Federkonstante [N/m]
 M_{Schw} = Masse des Schwingers [kg]
 ρ_{Pro} = Dichte der Probe [kg/m³]
 V_{Schw} = Volumen des Schwingers [m³]

Der Kehrwert der Eigenfrequenz aus Gleichung 12 ist als Schwingungsdauer T definiert:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_{\text{Schw}} + \rho_{\text{Pro}} V_{\text{Schw}}}{c}} \quad \text{Gleichung 13}$$

Mit: T = $1/f$ = Schwingungsdauer [s]

Quadriert und sortiert ergibt sich Gleichung 13 zu Gleichung 14:

$$T^2 = \rho_{\text{Pro}} \underbrace{\frac{4\pi^2 M_{\text{Schw}}}{c}}_B + \underbrace{\frac{4\pi^2 V_{\text{Schw}}}{c}}_A \quad \text{Gleichung 14}$$

Die Konstanten A und B enthalten die Federkonstante des Schwingers, dessen Leermasse und das Volumen des Präparates, welches an der Schwingung teilnimmt. A und B sind Apparatkonstanten, die aus zwei Messungen der Schwingungsdauer des Schwingers, gefüllt mit Substanzen bekannter Dichte, ermittelt werden können. Die Berechnung der Konstanten A und B können dem Anhang entnommen werden. Deren Zahlenwerte lauten:

- $A = 0,01977787018464 \text{ m}^3\text{s}^2/\text{kg}$
- $B = 23,58909986715 \text{ s}^2$

Somit ergibt sich für die Dichte aus der Schwingzeit T:

$$\rho_{\text{Pro}} = \frac{1}{A}(T^2 - B)$$

Gleichung 15

Mit: ρ_{Pro} = Dichte der Probe [kg/m^3]
T = Schwingungsdauer [s]
A = Berechnungskonstante [$\text{m}^3\text{s}^2/\text{kg}$]
B = Berechnungskonstante [s^2]

Setzt man die mit der gemessenen Schwingzeit T errechnete Dichte aus Gleichung 15 in die Gleichung 16 von Röben [8] mit den angegebenen Konstanten ein und stellt diese nach der Konzentration y um [Gleichung 17], erhält man die Konzentration bei der zugehörigen Temperatur t.

$$\rho_{\text{Pro}}(y, t) = c_1 + c_2 y + (c_3 + c_4 y)t + (c_5 + c_6 y)t^2$$

Gleichung 16

Mit: ρ_{Pro} = Dichte der Probe [kg/m^3]
t = Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
y = Konzentration [1/100]
 c_j = Berechnungskonstanten [-]

c_1	993,601758337	c_2	9,182506083	C_3	-0,020372421
c_4	-0,017742419	c_5	-0,004726655	C_6	0,000156629

Tabelle 5: Konstanten zur Berechnung der Dichte von Klimat 3930 S für den Konzentrationsbereich

$$0\% \leq y < 35\% \text{ [8]}$$

c_1	910,440776634	c_2	11,718085636	C_3	-0,392723556
c_4	-0,009253652	c_5	0,000480476	C_6	0,000051896

Tabelle 6: Konstanten zur Berechnung der Dichte von Klimat 3930 S für den Konzentrationsbereich

$$35\% \leq y \leq 62\% \text{ [8]}$$

Mit Hilfe der Gleichung 17 kann die Konzentration von Klimat durch Einsetzen der Konstanten c_1 bis c_6 und der gemessenen Schwingdauer t des Biegeschwingers berechnet werden.

$$y = \frac{\rho_{(y,t)} - c_1 - tc_3 - tc_5}{c_2 + c_4t + c_6t^2}$$

Gleichung 17

Mit: y = Konzentration [1/100]
 ρ_{Pro} = Dichte der Probe [kg/m³]
 t = Temperatur [°C]
 c_j = Berechnungskonstanten [-]

8.3.2 Konzentrationsmessung über die elektrische Leitfähigkeit

Bei der Messung der elektrischen Leitfähigkeit werden zwei von der Flüssigkeit vollständig bedeckten Elektroden verwendet. Der Strom wird durch die zu messenden Substanz von der einen zu der anderen Elektrode geleitet. Der Widerstand, den der Strom zu überbrücken hat, hängt von der Temperatur und der Leitfähigkeit der wässrigen Klimat-Lösung ab.

Die elektrische Leitfähigkeit beschreibt Gleichung 18:

$$\chi = G_{(T)} \frac{L}{A} \quad \text{Gleichung 18 [44]}$$

Mit: χ = elektrische Leitfähigkeit [S/m],
 $G_{(T)}$ = elektrischer Leitwert, (temperaturabhängig) [S]
 L = Länge des elektrischen Leiters [m]
 A = Querschnittsfläche des elektrischen Leiters [m²]

Der Quotient L/A [1/m] ist eine von der Geometrie der Zellen abhängige Konstante und ergibt sich aus dem Aufbau der Meßzelle.

8.3.2.1 Versuchsdurchführung

Die elektrische Leitfähigkeit χ ist durch den elektrischen Leitwert G von der Temperatur abhängig. Um die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von Klimat zu messen, wurden fünf unterschiedliche Konzentrationen im Bereich von 35 % bis 60 % hergestellt. Die Konzentration der Proben wurde mit Hilfe der im vorherigen Kapitel beschriebenen Biegeschwingermethode kontrolliert. In einem Temperierbecken wurde im Rahmen der Voruntersuchungen dieser Arbeit die Leitfähigkeit der so bekannten Konzentrationen in einem Temperaturbereich von 15 °C bis 40 °C gemessen und in der Abbildung 24 aufgetragen. Als digitales Leitfähigkeitsmessgerät kommt das PW 9509/20 der Firma Philips [45] mit einer Zweipunktzelle (Zellenkonstante 0,99) zum Einsatz. Da die Leitfähigkeit der Sole, wie deutlich aus der Abbildung 24 ersichtlich ist, stark von der Temperatur abhängt, wurde im Hinblick auf die DIN 38404 [44] 25 °C als Bezugstemperatur festgelegt, um unterschiedliche Konzentrationen miteinander vergleichen zu können. Die gemessenen Leitfähigkeiten der fünf gewählten Konzentrationen sind in der Abbildung 25 -bezogen auf die

Referenztemperatur von 25 °C- aufgetragen. Wird die Leitfähigkeit der Probe bei einer von 25 °C abweichenden Temperatur gemessen, so kann die Konzentration von Klimat in einem Temperaturbereich von 15 °C bis 40 °C mittels der Abbildung 24 abgelesen werden. Sollte die Leitfähigkeit der Probe bei der Referenztemperatur gemessen werden, so kann die Konzentration von Klimat mit Hilfe der Abbildung 25 in einem Konzentrationsbereich von 35 % bis 60% bestimmt werden.

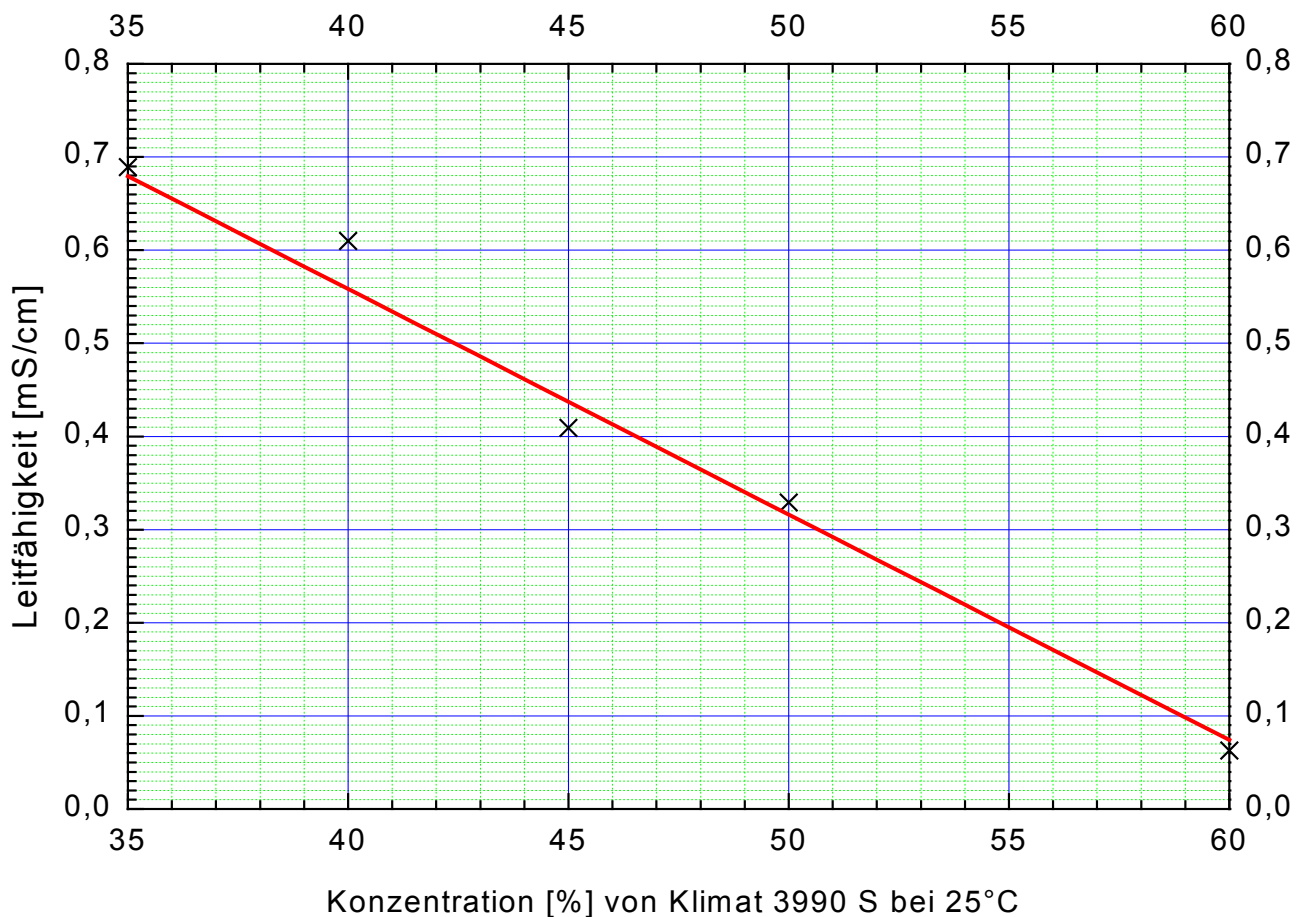


Abbildung 24: Leitfähigkeit von Klimat 3930 S der Konzentrationen 35 %, 40 %, 45 %, 50 % und 60 % im Temperaturbereich von 15 °C bis 40 °C.

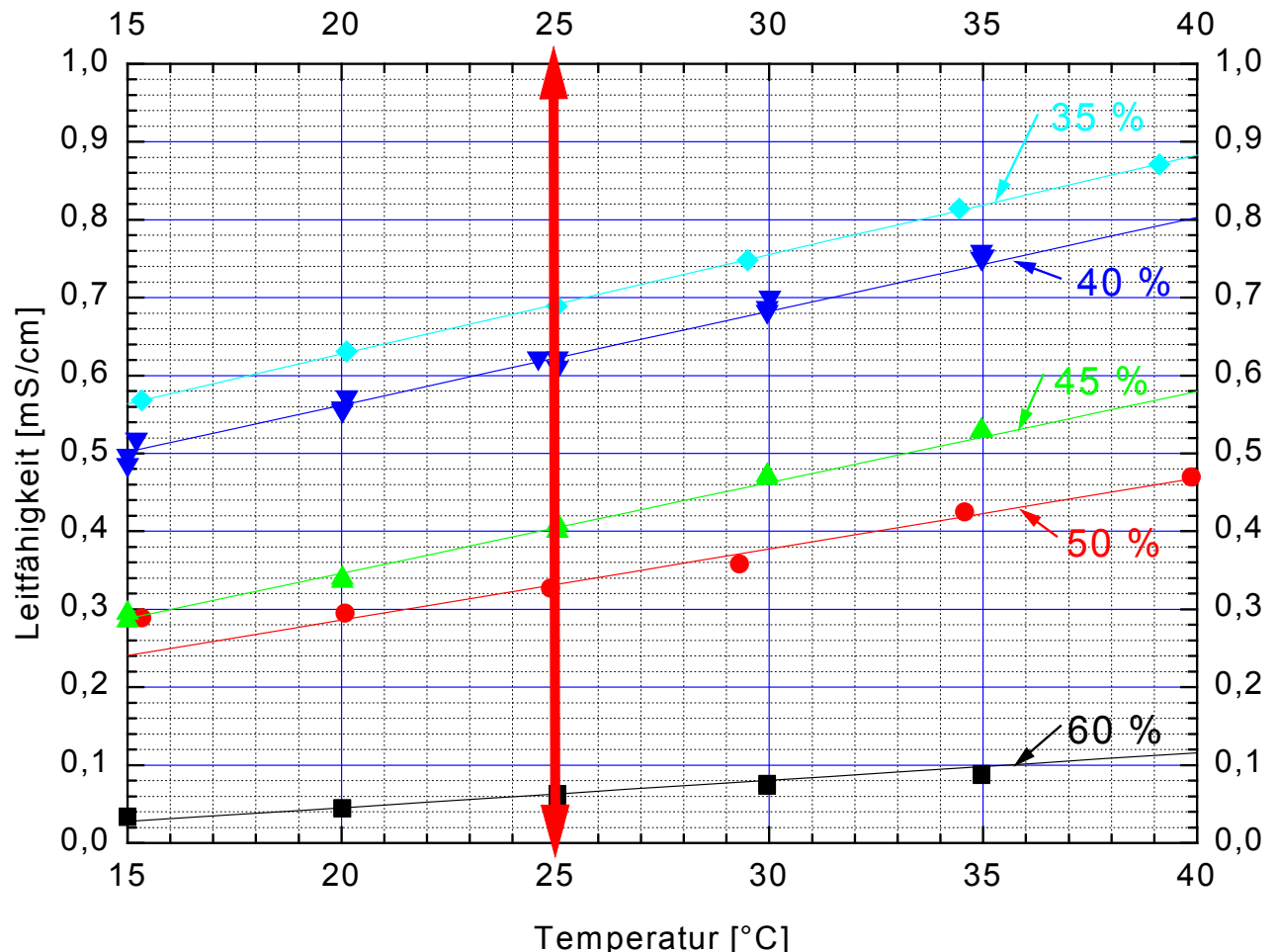


Abbildung 25: Leitfähigkeit von Klimat 3930 S in Abhängigkeit der Konzentration im Bereich von 35 % bis 60 % bezogen auf die Referenztemperatur von 25 °C [44]

Durch die im Vergleich zur Biegeschwingermethode vereinfachte Messung der Konzentration von Klimat über die Leitfähigkeit, ist es durch die durchgeführten Messreihen nun möglich, die Konzentration in einer Entfeuchtungsanlage, die mit Klimat betrieben wird, hinreichend genau zu bestimmen.

Mit den in diesem Kapitel: „8 Ergebnisse der Voruntersuchung“ gewonnenen Erkenntnissen wurde der im folgenden Kapitel: „9 Versuchsaufbau“ beschriebene Versuchsstand (vgl. [46]) aufgebaut. Finanzielle Unterstützung wurde durch das Bundesministerium für Forschung und Technik sowie der Firma Mennerga Apparatebau Mühlheim, zur Verfügung gestellt.

9 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau anhand des nachfolgenden Anlagenschemas nach Gernemann [46] in Abbildung 26 erklärt.

Die unterschiedlichen Medienführungen von:

- Luft
- Salz (Sole)
- Wasser (Kühlung)

werden zum besseren Verständnis getrennt voneinander beschrieben. Diese drei Medien werden im Herzen der Anlage, dem so genannten Absorber zusammengeführt und im Kapitel: „9.5 Absorberaufbau“ (Verlauf der Medienströme: Luft, Sole und Kühlwasser) in ihrer Wechselwirkung erläutert.

9.1 Anlagenschema

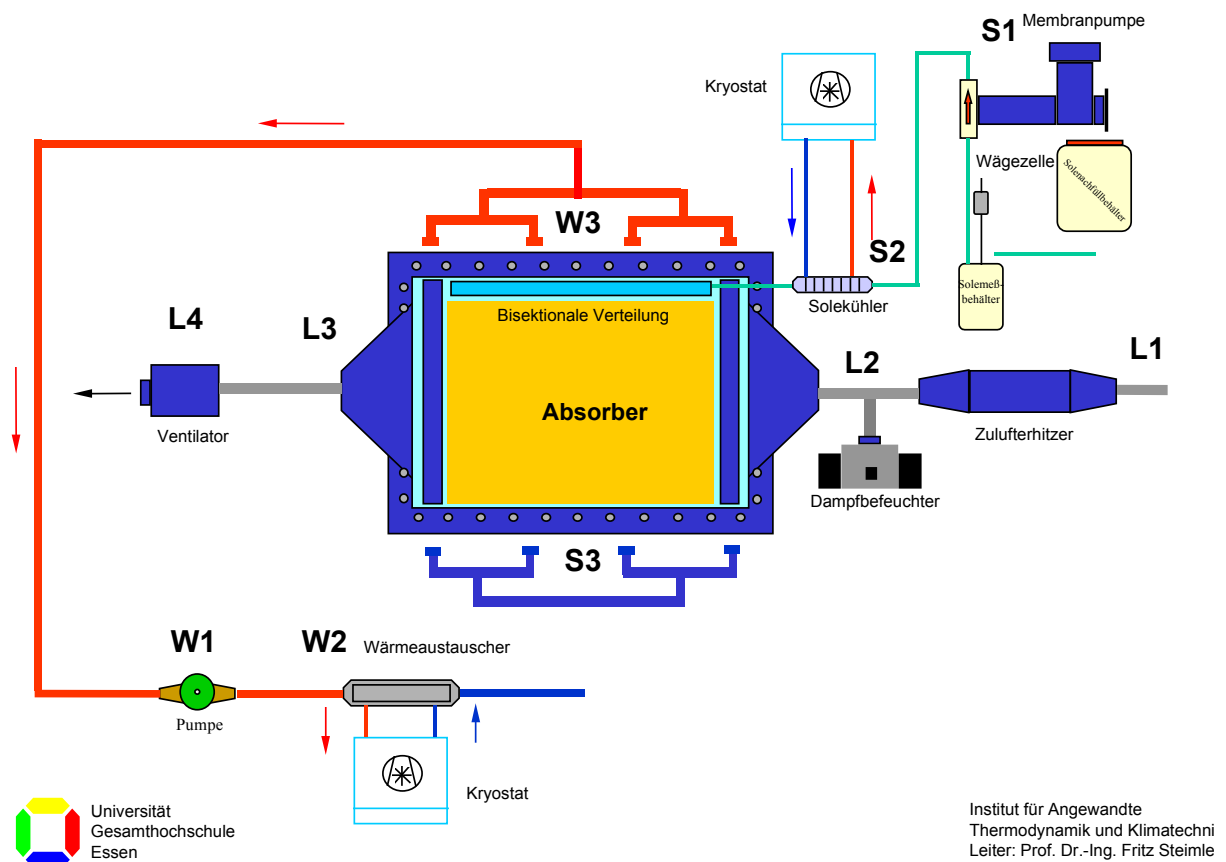


Abbildung 26: Schema des Versuchsaufbaus zur Vermessung des Absorbers nach [46]

9.2 Luftführung

Die Außenluft wird im Luftherhitzer vom Zustandspunkt L1 (Umgebungstemperatur der Versuchshalle) auf eine Temperatur von $t = 32\text{ °C}$ erwärmt und durch den anschließenden Dampfbefeuchter auf eine relative Feuchte von $\varphi = 40\text{ \%}$ (12g/kg abs. Feuchte) angehoben. Die so auf einen typischen Sommerfall konditionierte Luft wird durch den Ventilator (L4) horizontal über den Absorber (L3) gesaugt.

9.3 Solestrom

Die wässrige Salzlösung wird mit Hilfe einer Membranpumpe (S1) aus einem Behälter gefördert, deren Gewichtsabnahme mittels einer Wägezelle protokolliert wird. Zwischen dem Zustandspunkt S2 und dem Zustandspunkt S3 wird die Sole auf eine Temperatur von 20 °C gebracht und über die im Kapitel: „8.1.2 Bisektionale Verteilung“ beschriebene Plexiglasschiene auf der Absorberoberfläche verteilt. Die Sole läuft vertikal durch den Absorber, wo sie am unteren Ende aufgefangen und in einem separaten Gefäß gesammelt wird.

9.4 Kühlkreislauf (Wasser)

Der Kühlkreislauf des Absorbers wird durch eine Umwälzpumpe (W1) angetrieben. Über einen Wärmeaustauscher (W2) wird das Kühlwasser auf einer Temperatur von 20 °C gehalten. Das Wasser durchströmt die Kanäle der Doppelstegplatte von „unten“ nach „oben“ (siehe Kapitel: „9.5 Absorberaufbau“) und wird anschließend zur Umwälzpumpe zurückgeführt.

9.5 Absorberaufbau

Bei dem untersuchten Absorber handelt es sich um einen Plattenabsorber, in dem die Luft zu der hygroskopisch wirkenden wässrigen Salzlösung im Kreuzstrom geführt wird. Der eigentliche Absorber besteht aus einer Doppelstegplatte, deren Kanäle von Kühlwasser durchflossen werden, um die entstehende Sorptionswärme abzuführen.

In der nachfolgenden „Explosionszeichnung“ (Abbildung 27) ist der Aufbau des Absorbers anschaulich dargestellt. Die Doppelstegplatte wird in einen Zwischenrahmen integriert, in dem jeweils oben und unten ein schmaler Längsspalt für den Ein- und Austritt des Kühlwassers eingefräst worden ist.

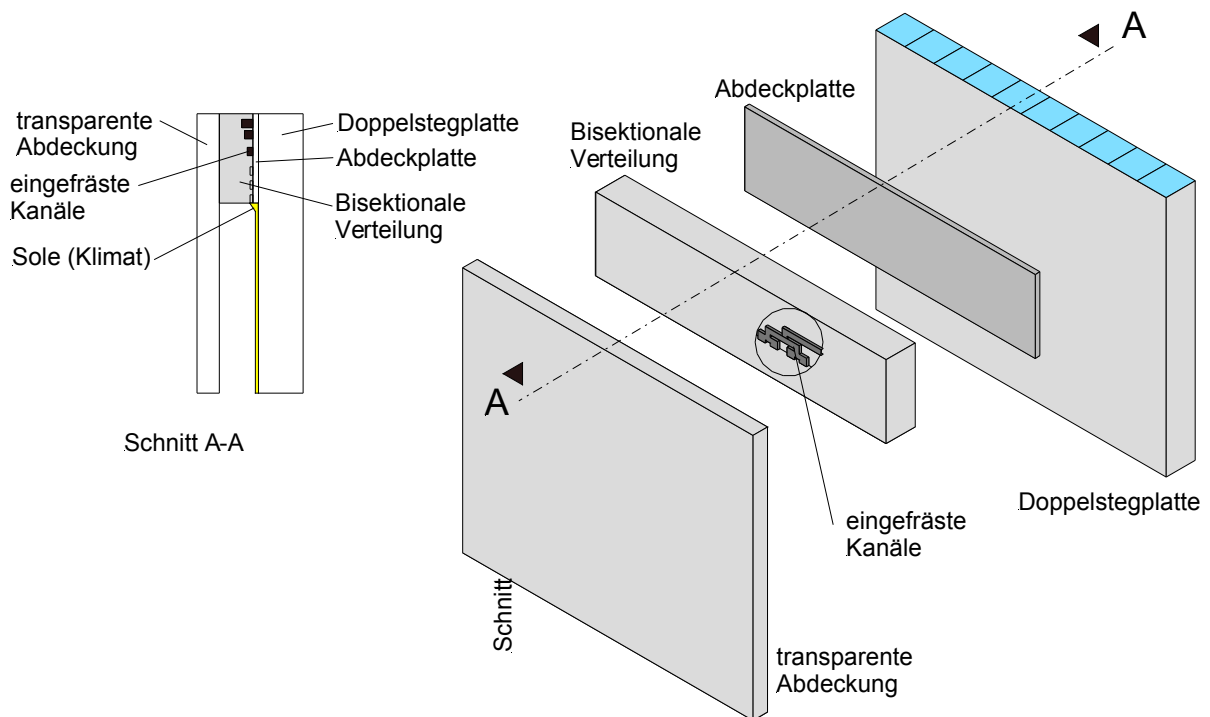


Abbildung 27: Schnitt- und Explosionszeichnung des Absorbers mit den in der Verteilung eingeprägten bisektionalen Kanälen.

Dieser Zwischenrahmen wurde zusammen mit der Doppelstegplatte in zwei äußere Rahmen eingespannt, von denen einer die Anschlüsse für das Kühlwasser enthält. In der nachfolgenden Abbildung 28 sind die drei verschraubten Rahmen des Absorbers zu erkennen, die mit den Anschlüssen für das Kühlwasser versehen sind.

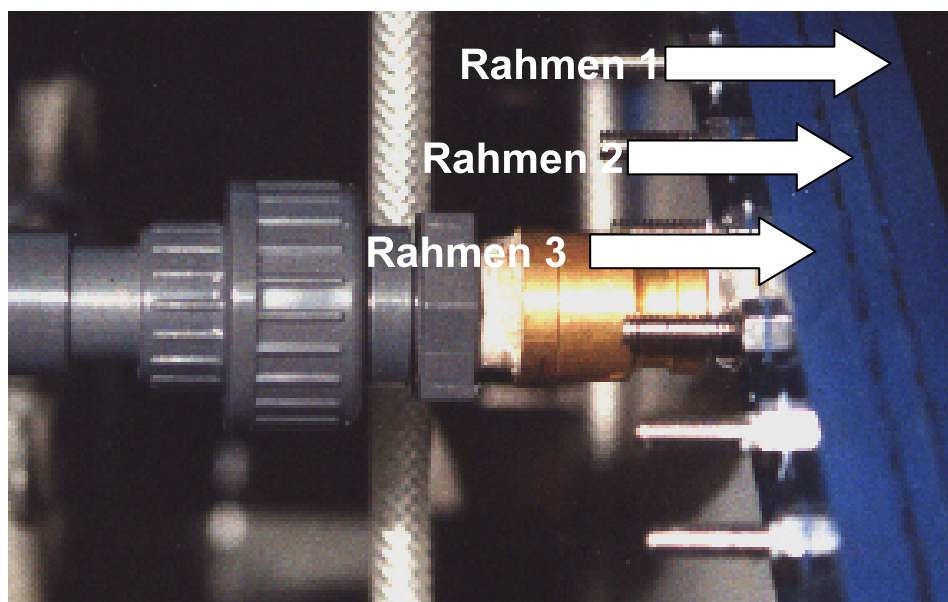
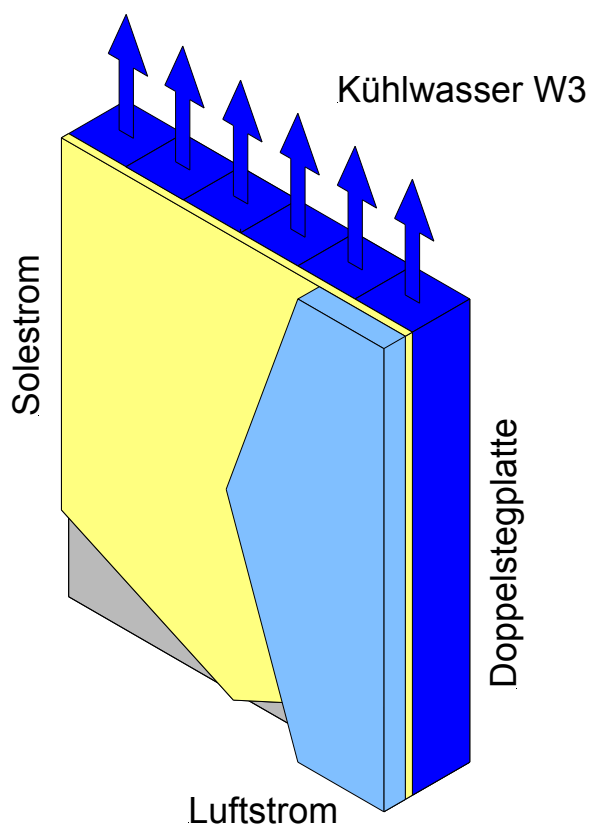


Abbildung 28: verschraubter Absorberrahmen mit den Kühlwasseranschlüssen

Die Fläche zwischen dem Innenrahmen und den beiden äußeren Rahmen wurde mit einer Dichtung versehen, deren Abmaße der Einzelteilzeichnung (Kapitel 16.1.2) entnommen werden können. Dieses im Absorberaufbau verwendete Dichtungsmaterial wird sonst zur Elastomerbeschichtung großer Walzen in der Textilindustrie eingesetzt. Dieses weiche Gummi eignet sich hervorragend zur Abdichtung der relativ großen Dichtungsflächen. Die einzelnen Rahmen werden im Anschluss miteinander verschraubt.

Der Verlauf der einzelnen Medienströme ist schematisch in der Abbildung 29 dargestellt. Die wässrige Salzlösung (hier Klimat) wird durch die Plexiglasschiene auf der Oberfläche der Doppelstegplatte verteilt. Das Klimat fließt in einem dünnen Film auf der Plattenoberfläche vertikal herunter und kreuzt die horizontal über die Platte strömende Luft. Bei diesem direkten Kontakt zwischen Luft und Klimat wird durch die hygroskopischen Eigenschaften der Salzlösung der Luft ein Teil ihrer Feuchtigkeit



entzogen. Die aufgrund des Aggregatwechsels des Wassers in der Luft in die Sole freiwerdende latente Wärme, wird zum Teil durch die Doppelstegplatte an das Kühlwasser abgegeben. Die durch die Feuchtigkeitsaufnahme verdünnte Sole fließt ab und wird zur Regeneration aufgefangen. Der so entfeuchtete Luftstrom verlässt den Absorber und kann entweder zur Prozessluftentfeuchtung oder bei Abkühlung auf Zulufttemperatur zur Raumluftkonditionierung verwendet werden.

Abbildung 29: Verlauf der Medienströme: Luft, Sole und Kühlwasser

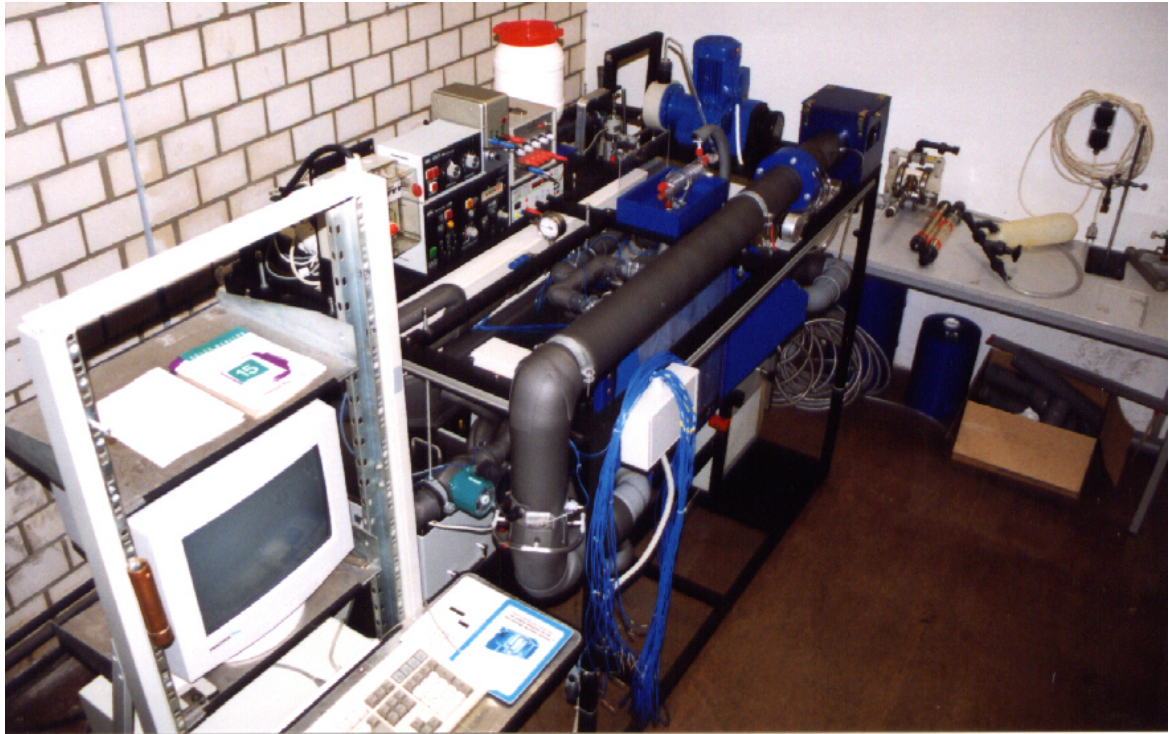


Abbildung 30: Fotografische Aufnahme des Versuchsstandes mit der Messwerterfassung

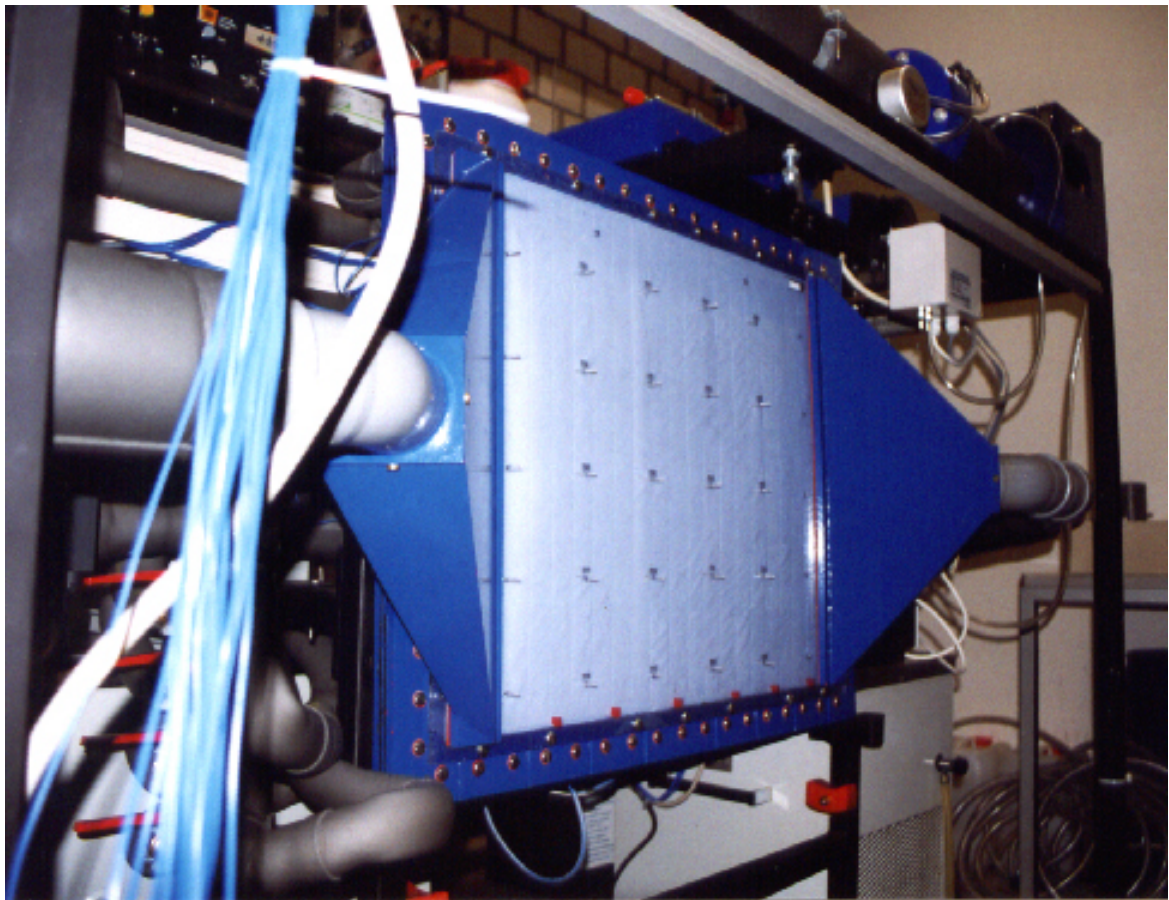


Abbildung 31: Fotografische Aufnahme des ungedämmten Absorbers

In der Abbildung 30 ist eine fotografische Draufsicht des Versuchsstandes zu sehen, der in einem beweglichen Stahlrahmen montiert wurde. An der linken Bildseite ist die Messwerterfassung zu erkennen, die kurz im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird. In Abbildung 31 wurde der ungedämmte Absorber fotografiert. Für die Vorversuche wurde der Absorber nicht gedämmt, da anderenfalls ein Einblick auf die Absorberplatte nicht möglich gewesen wäre. Die trapezförmigen Zuluftführungen werden an die transparente Abdeckung angeschraubt (siehe 16.1.2). Die bisektionale Verteilung, die parallel zum Rand des Absorbers angebracht wird, ist zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht montiert worden. Am unteren Ende des Absorbers in der Abbildung 31 sind die kleinen Stege erkennbar, die die Sektionen ausbilden, aus denen die Proben für die Konzentrationsmessung entnommen werden können. An der linken Seite in der gleichen Abbildung sind die Thermoelemente sichtbar, die frontal durch die Abdeckung in einem Rastermaß von 10 cm auf die Absorberoberfläche montiert wurden. Die Thermoelemente konnten erst nach der Montage der Absorberdämmung in die die transparente Abdeckung durchdringenden Röhrchen eingeführt werden. In der nachfolgenden Abbildung 32 ist im Schnitt „lupenhafte“ das Detail dargestellt, an der Stelle das eingesetzte Thermoelement die Temperatur auf der Absorberoberfläche erfasst. Dieses Detail ist wichtig, um bei der Versuchsauswertung im Kapitel 11 die gemessenen Temperaturen nachvollziehen zu können.

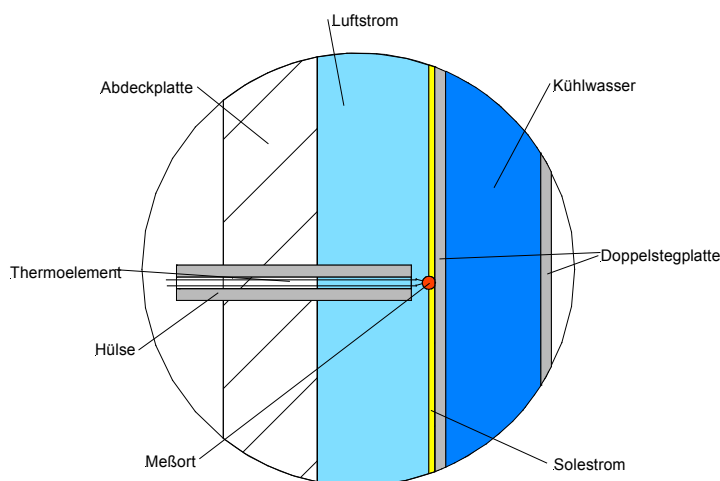


Abbildung 32: Schnittdarstellung des eingesetzten Thermoelementes durch die transparente Abdeckung auf die Absorberoberfläche

Die technischen Zeichnungen zur Herstellung des beschriebenen Absorbers sind im Anhang (Kapitel 16.1.2) zu finden.

9.6 Messtechnik

Der Versuchsaufbau und die notwendige Messtechnik zur Erfassung der Messwerte wurde mithilfe von [46] aufgebaut. Die Messwerte, die Aussagen über die Konzentrations- und Temperaturfelder liefern, bilden die Grundlage für das Kapitel: „11 Auswertung und Darstellung der Messergebnisse“. Es wurden 60 Messwerte in Form von Spannungen alle 7 Sekunden von einem Messwerterfassungsprogramm aufgezeichnet und in physikalische Einheiten umgerechnet.

Die verwendete Messtechnik wird anschließend kurz erläutert, die einzelnen Messverfahren werden als bekannt vorausgesetzt. Die so genannten äußeren Randparameter wurden einmalig eingestellt und konnten dann von der Versuchsanlage geregelt und konstant gehalten werden.

Zu den geregelten und konstant gehaltenen Randparametern gehören:

- der Luftvolumenstrom,
Die Überströmgeschwindigkeit im Absorber wird auf eine Volumenstrommessung nach DIN 1952 [47] durch einer Blende zurückgeführt. Die maximale Abweichung vom Mittelwert liegt bei den gewählten Geschwindigkeiten unter 0,2 m/s [46].
- die Lufttemperatur,
Für die Messung der Temperatur werden Thermoelemente aus Kupfer und Konstantan eingesetzt. Die maximale Abweichung von der Messtemperatur beträgt $\pm 0,2$ Kelvin.
- die Luftfeuchte,
Die eingesetzten Feuchtefühler der Firma VAISALA [48] sind mit einer Fehlertoleranz von $\pm 2\%$ relativer Feuchte angegeben.
- die Kühlwassertemperatur der Absorberplatte,
Die Kühlwassertemperatur wird über einen Wärmeaustauscher durch einen Kryostat der Firma Lauda vom Typ RL 6 CS konstant gehalten. Bei der eingesetzten Pumpe zur Förderung des Kühlwassermassenstromes handelt es sich um eine Umwälzpumpe vom Typ RS 25/70 der Firma Wilo GmbH. Diese Bauweise der Pumpe ermöglicht es von Maximaldrehzahl bis nahezu Stillstand zu

fahren [46]. Zur Messung des Volumenstromes wird ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät der Firma Heinrichs Meßgeräte vom Typ EDP 571 eingesetzt [49].

- der Volumenstrom und die Temperatur der Sole (Klimat).

Zur Förderung der Salzlösung wird eine Kolbenmembranpumpe der Firma PCM Pompes eingesetzt. Diese Pumpe wurde speziell für diesen Versuchsaufbau angeschafft, da sich aus den Erfahrungen von Kourouma [37] und Röben [8] eine kontinuierlichen Förderung von Klimat, durch dessen große Viskosität gerade bei kleine Volumenströmen, als problematisch erweist. Die Kolbenmembranpumpe stellte sich aus einer großen Auswahl andere Pumpen als die zweckmäßigste heraus. Eine spezielle Dosiereinstellung gewährleistet, dass die Pumpe über ihr gesamtes Förderspektrum in Schritten von 1 % betrieben werden kann.

Um den Massenstrom der Salzlösung zu erfassen, wird eine Wägezelle der Firma HBM vom Typ U1 eingesetzt, die die Gewichtsabnahme des Solebehälters registriert und in Spannungssignale umsetzt. Die Sole wird über einen Wärmeaustauscher durch einen Kryostat der Firma Lauda vom Typ R4RD temperiert.

Im nächsten Kapitel: "10 Messreihen" werden zunächst die durchgeführten Versuche aufgetabelliert. Anschließend werden die aufgezählten Randparameter diskutiert, die während der Versuche konstant gehalten werden und die variiert werden, um Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Absorber treffen zu können.

10 Messreihen

10.1 Übersicht der am Absorber durchgeführten Messreihen

Bezeichnung	Absorberoberfläche	Überströmgeschwindigkeit	Anfangskonzentration
[-]	[-]	[m/s]	[%]
AW1W52	Wabenvlies	1	52
AW2W52	Wabenvlies	2	52
AW3W52	Wabenvlies	3	52
AW4W52	Wabenvlies	4	52
AW5W52	Wabenvlies	5	52
AW1P52	Polykarbonatplatte	1	52
AW2P52	Polykarbonatplatte	2	52
AW3P52	Polykarbonatplatte	3	52
AW4P52	Polykarbonatplatte	4	52
AW5P52	Polykarbonatplatte	5	52
AW1W60	Wabenvlies	1	60
AW2W60	Wabenvlies	2	60
AW3W60	Wabenvlies	3	60
AW4W60	Wabenvlies	4	60
AW5W60	Wabenvlies	5	60
AW1P60	Polykarbonatplatte	1	60
AW2P60	Polykarbonatplatte	2	60
AW3P60	Polykarbonatplatte	3	60
AW4P60	Polykarbonatplatte	4	60
AW5P60	Polykarbonatplatte	5	60
AW1WWST	Wabenvlies	1	Wärme
AW2WWST	Wabenvlies	2	
AW3WWST	Wabenvlies	3	
AW4WWST	Wabenvlies	4	
AW5WWST	Wabenvlies	5	Und
AW1PWST	Polykarbonatplatte	1	
AW2PWST	Polykarbonatplatte	2	
AW3PWST	Polykarbonatplatte	3	
AW4PWST	Polykarbonatplatte	4	
AW5PWST	Polykarbonatplatte	5	Stofftransport

Tabelle 7: Übersicht der durchgeführten Messreihen

In der Tabelle 7 sind die am Absorber durchgeführten Versuchsreihen zusammengefasst. Diese Versuchsreihen sollen Aufschluss über die Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit der beiden Absorber geben, die sich hinsichtlich ihrer im Kapitel 8.2 Oberfläche des Absorbers beschriebenen Oberflächen unterscheiden:

Absorber I:

- Doppelstegplatte aus Polypropylen, Oberfläche aus Wabenvlies

Absorber II:

- Doppelstegplatte aus Polycarbonat, Oberfläche wasserspreitend

In den beiden nachfolgenden Kapiteln werden die Versuchsparameter diskutiert, die während der Versuche konstant gehalten und die variiert wurden.

10.2 Konstante Versuchsparameter

Nachfolgende Randparameter wurden während der Durchführung der Versuche konstant gehalten, da diese die Entfeuchtungsleistung zwar generell mit beeinflussen, jedoch für den Vergleich der Leistungsfähigkeit der beiden zu untersuchenden Oberflächen nicht von Bedeutung sind:

- Die Eintrittstemperatur und die Eintrittsfeuchte der Luft

Die Eintrittstemperatur der Luft wurde auf 32 °C und eine absolute Eintrittsfeuchte von $x=12 \text{ g/kg}_{\text{tr L}}$ festgelegt. Das entspricht einer relativen Feuchte von 40%.

- die Temperatur und der Massenstrom des Kühlwassers in der Doppelstegplatte

Die Temperatur des Kühlwassers, wurde konstant auf 20 °C gehalten. Die Durchflußmenge beträgt konstant 100 l/h.

- die Temperatur der Eintrittssole:

Die Sole wurde vor Eintritt in den Absorber auf eine Temperatur von 20 °C abgekühlt.

Die Festlegung der Kühlwassertemperatur und der Sole erfolgt aus rein praktischen Überlegungen:

Einerseits ist es dadurch möglich mit einem Kühlwasserkreislauf auszukommen, andererseits kann die gewählte Temperatur von 20 °C durch Brunnen- oder Leitungswasser oder durch den Verbund z. B. mit einem Rückkühlwerk [50] realisiert werden.

10.3 Variable Versuchsparameter

Die beiden Oberflächen der Absorber werden hinsichtlich ihrer Entfeuchtungseigenschaften mit unterschiedlicher Startkonzentration der Sole untersucht. Die erste Versuchsreihe startet mit einer Konzentration von 60 %, die zweite mit einer Konzentration der Sole von 52 %. Die Kristallisationsgrenze von reinem Klimat liegt bei 62 % (vergleiche Tabelle 3 Kapitel 7.2.2). Da jedoch kleinste Verunreinigungen die Kristallbildung bereits bei einer niedrigeren Konzentration einsetzen lassen, wurde die größtmögliche Startkonzentration der Sole bei der ersten Versuchsreihe auf 60 % gelegt. Die große Viskosität von Klimat bei dieser Konzentration und die damit verbundene Leistung der Pumpe für die Soleförderung, führte zu einer zweiten Versuchsreihe mit einer Startkonzentration der Sole von 52 %. Zusätzlich zur Veränderung der Konzentration der Sole wurde die Überströmgeschwindigkeit der Luft über die benetzte Absorberfläche als Variable gewählt. Röben [8] stellte durch ähnliche Versuchsreihen fest, dass die Verweilzeit des Sorbens mit der Luft, einen massgeblichen Einfluss auf den Kondensationsvorgang der Luftfeuchtigkeit hat. Als Überströmgeschwindigkeiten der Luft über den Absorber wurden 1-5 m/s im Abstand von 1 m/s gewählt, entsprechend den üblichen Geschwindigkeiten in RLT-Anlagen.

Im nächsten Kapitel 11 werden die beschriebenen Versuchsreihen ausgewertet und grafisch dargestellt.

11 Auswertung und Darstellung der Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die gemessenen Werte grafisch dargestellt und die Ergebnisse diskutiert. Zunächst werden die Messwerte in den nachfolgenden Kapiteln hinsichtlich Konzentration, Temperatur, Druckverluste, Entfeuchtungsbreite und der Wärme- und Stoffübergänge einzeln ausgewertet und anschließend miteinander verglichen, um Gemeinsamkeiten zu finden.

11.1 Konzentrationsverteilung auf der Platte

Um Aussagen hinsichtlich der Konzentrationsabnahme der Sole auf den untersuchten Oberflächen zu erhalten, wurden am unteren Ende des Absorbers sechs Proben der Sole je Überströmgeschwindigkeit aufgefangen. Diese sechs Öffnungen waren im Absorber durch kleine Stege gegeneinander abgegrenzt, so dass sich die Konzentration der Proben aus einem vertikalen Streifen von ca. 10 cm Breite zusammensetzt (siehe Kapitel: 9.5 Absorber). Es wurde die Konzentration von 120 Proben über die Biegeschwingermethode (vergleiche Kapitel: 8.3.1) bestimmt, um anhand derer Aussagen über die Konzentrationsverteilung auf der Absorberoberfläche zu treffen. Trotz der Ergebnisse der Voruntersuchungen wurden die Konzentrationen über die Biegeschwingermethode bestimmt, da die Messung der Konzentration über die Dichte durch die vorgebenden Randparameter des Biegeschwingers exakter ist. In den Diagrammen sind die Aussagen so dargestellt, dass die Diagrammfläche sinnbildlich die Absorberfläche darstellt: links über die Höhe ist die Konzentration aufgetragen, die Soledurchlässe entsprechen der Breite des Absorbers. Die Sole fließt vertikal von oben nach unten ab und nimmt die Feuchtigkeit der von rechts eintretenden, horizontal über die Platte streichenden Luft auf und bewirkt so eine Konzentrationsabnahme der Sole.

Die Abnahme der Solekonzentration bei steigender Überströmgeschwindigkeit aller untersuchten Proben weicht nur geringfügig voneinander ab, so dass qualitative Aussagen nur tendenziell anhand der Mittelwerte getroffen werden können.

11.1.1 Konzentrationsverlauf auf der Absorberfläche mit einer Anfangskonzentration der Sole von 60 %

In der nachfolgenden Abbildung 33 ist die Abnahme der Anfangskonzentration von 60 % auf der Absorberplatte mit der Wabenvliesoberfläche dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich der ersten Durchlässe (Nr.: 1-3) die Konzentration der Sole am geringsten ist. In diesem Bereich kommt die Luft in Kontakt mit unverdünnter Sole, so dass das treibende Entfeuchtungspotential hier am größten ist.

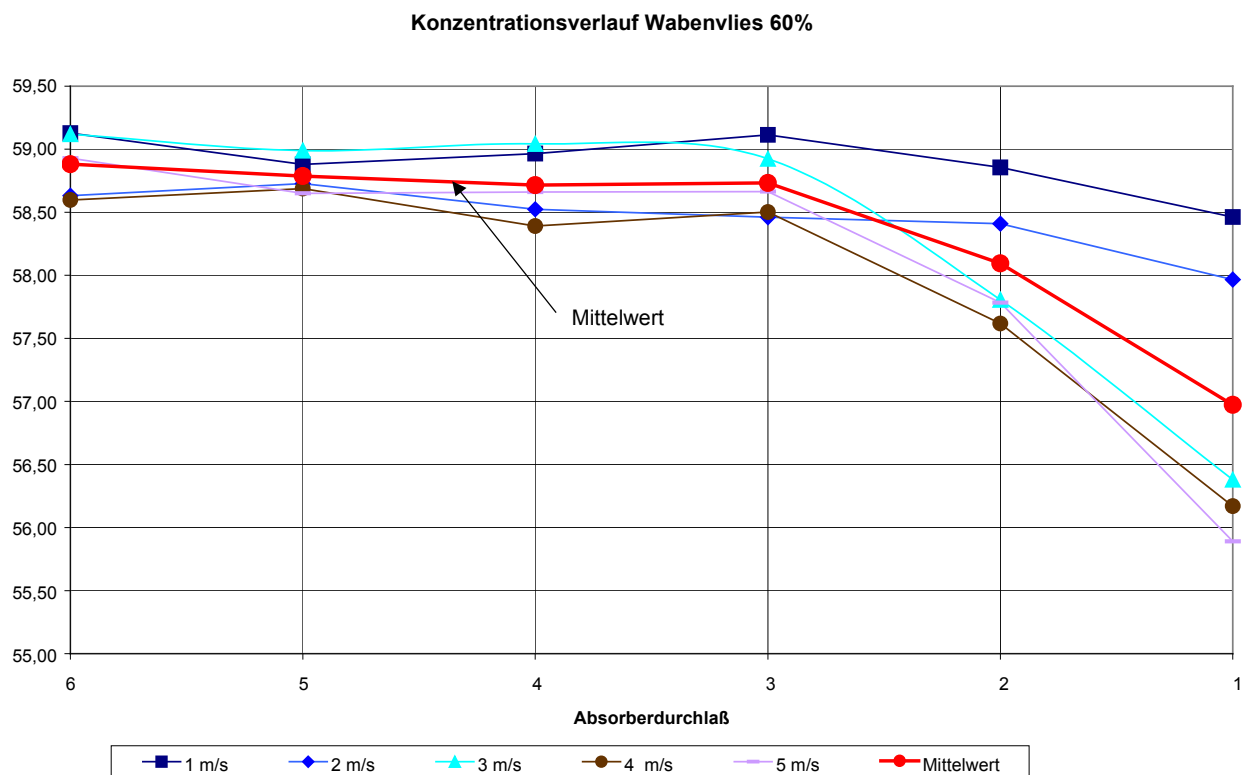


Abbildung 33: Konzentrationsverlauf der Sole auf der Wabenvliesoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 60 %

Der Trendverlauf, der geringsten Konzentration im Bereich der ersten Durchlässe, lässt sich auch in der Abbildung 34 erkennen, in der die Abnahme der Konzentration auf der Polycarbonatoberfläche dargestellt ist.

Die Soledurchlässe wurden in den Diagrammen der Konzentrationsverläufe entlang des Strömungsweges der Luft durchnummeriert, von rechts nach links (vgl.: Kapitel 9.5 Absorberaufbau).

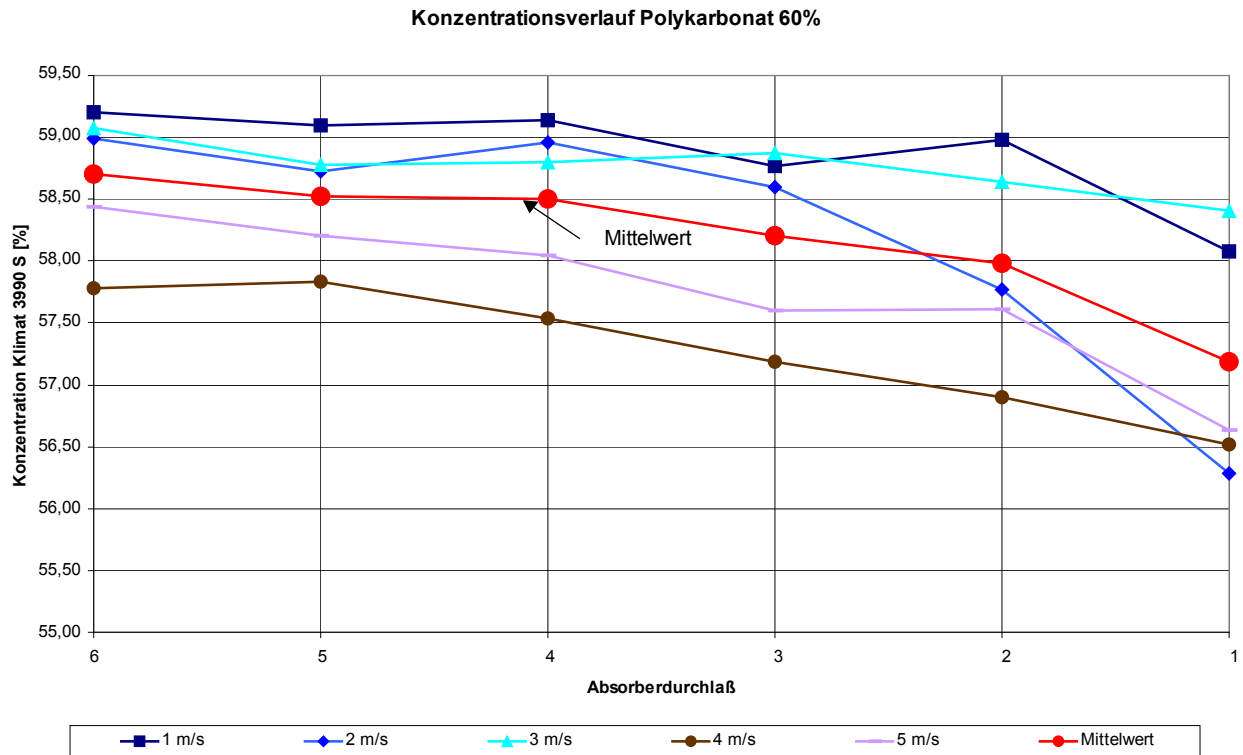


Abbildung 34: Konzentrationsverlauf der Sole auf der Polykarbonatoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 60 %

Tendenziell ist auf beiden Oberflächen bei einer Startkonzentration der Sole von 60 % erkennbar, dass eine Steigerung der Luftgeschwindigkeit im ersten Drittel der Absorberplatte zu einer größeren Konzentrationsabnahme der Sole führt. Übersteigt die Strömungsgeschwindigkeit der Luft über die Platte 4 m/s, ist bei beiden Absorberplatten ein geringfügiger Rückgang der Konzentrationsabnahme zu verzeichnen. Diese geringere Entfeuchtungsbreite ist durch eine kurze Kontaktzeit der Sole mit der Luft zu erklären. Der Verlauf der Konzentrationsabnahme ist ab einem Drittel der überströmten Absorberfläche konstant.

Der horizontale Mittelwert der Konzentrationsabnahme der Sole beträgt bei der Wabenvliesoberfläche $K=1,6 \%$ und bei der Polykarbonatoberfläche $K=1,8 \%$ bei einer Startkonzentration von 60 %.

11.1.2 Konzentrationsverlauf auf der Absorberfläche mit einer Anfangskonzentration der Sole von 52 %

Die Tendenz einer verringerten Abnahme der Solekonzentration in Richtung der Luftströmung, ist bei einer Anfangskonzentration der Sole von 52 % nur im Verlauf des Mittelwertes in der Abbildung 35 zu erkennen. Abgesehen von dem Konzentrationsverlauf bei einer Überströmungsgeschwindigkeit von 5 m/s zeichnet sich eine relative gleichmäßige Entfeuchtung über der Fläche ab.

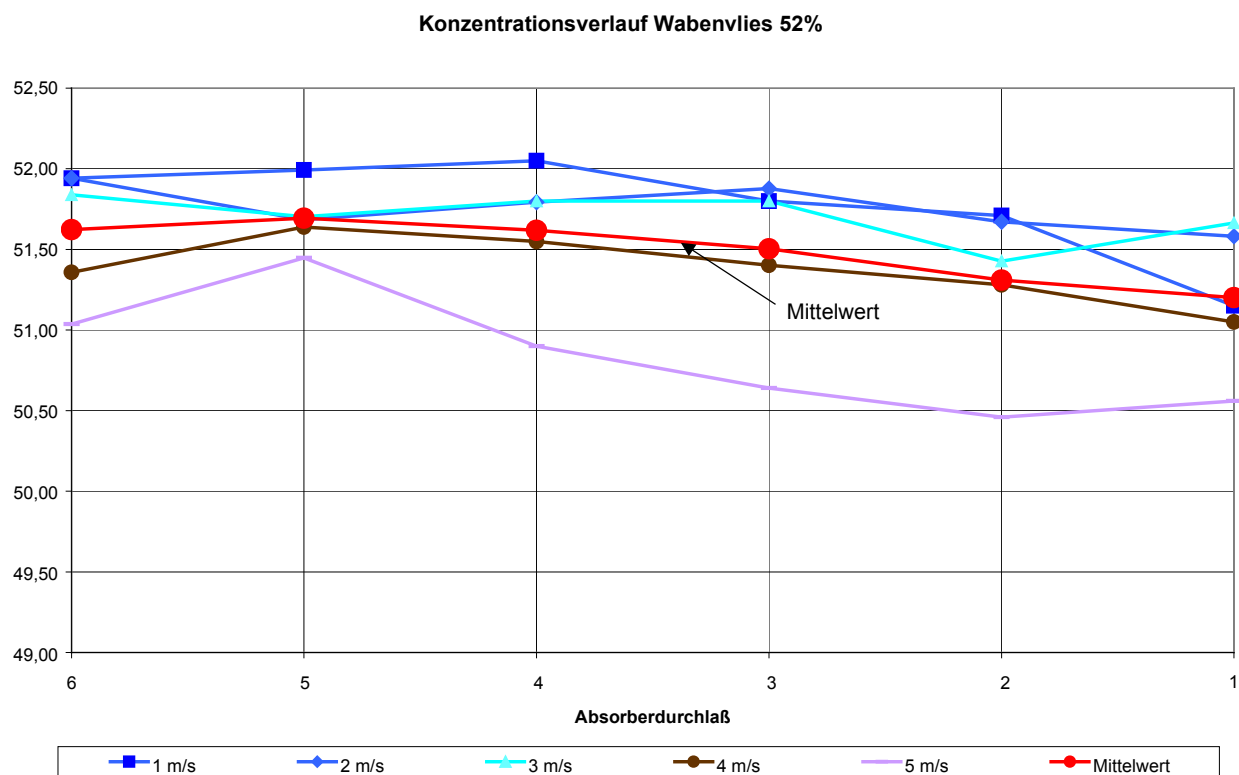


Abbildung 35: Konzentrationsverlauf der Sole auf der Wabenvliesoberfläche bei einer Startkonzentration von 52 %

Die Tendenz der verringerten Abnahme der Solekonzentration der Luftströmung folgend, ist bei der Polykarbonatoberfläche und einer Anfangskonzentration der Sole von 52 % nur schwer zu erkennen (Abbildung 36). Warum der Konzentrationsverlauf bei 1 m/s und 5 m/s Strömungsgeschwindigkeit über die Platte am geringsten ist, lässt sich anhand dieser Konzentrationsauswertung nicht erklären.

Der horizontale Mittelwert der Konzentrationsabnahme der Sole beträgt bei der Wabenvliesoberfläche $K=0,5\%$ und bei der Polykarbonatoberfläche $K=1\%$ bei einer Anfangskonzentration der Sole von 60 %.

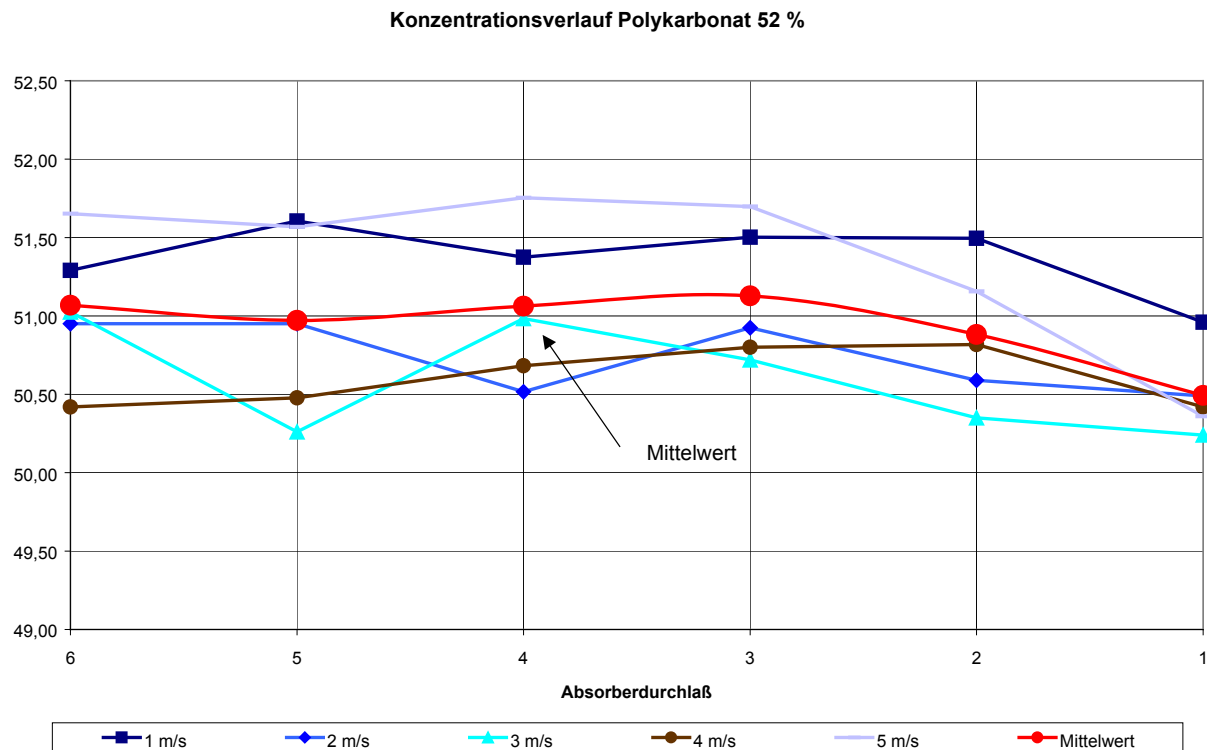


Abbildung 36: Konzentrationsverlauf der Sole auf der Polykarbonatoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 52 %

11.1.3 Vergleich der Konzentrationsverläufe auf der Wabenvliesoberfläche und der Polykarbonatoberfläche mit einer Anfangskonzentrationen der Sole von 52 % und 60 %

Werden die Polykarbonatoberfläche und die Wabenvliesoberfläche hinsichtlich ihres Konzentrationsverlaufes bei einer Anfangskonzentration der Sole von 60 % verglichen, so fällt auf, dass der Verlauf des Mittelwertes und die durchschnittliche Konzentrationsabnahme nahezu identisch ist (Abbildung 37; siehe auch Tabelle 8). Der Konzentrationsverlauf bei einer verringerten Startkonzentration der Sole von 52 % ist zum besseren Vergleich ebenfalls in der Abbildung 37 dargestellt. Die Feuchtigkeitsaufnahme ist im Mittelwert um ca. 1 % verschoben, der horizontale Verlauf lässt keine Unterschiede erkennen.

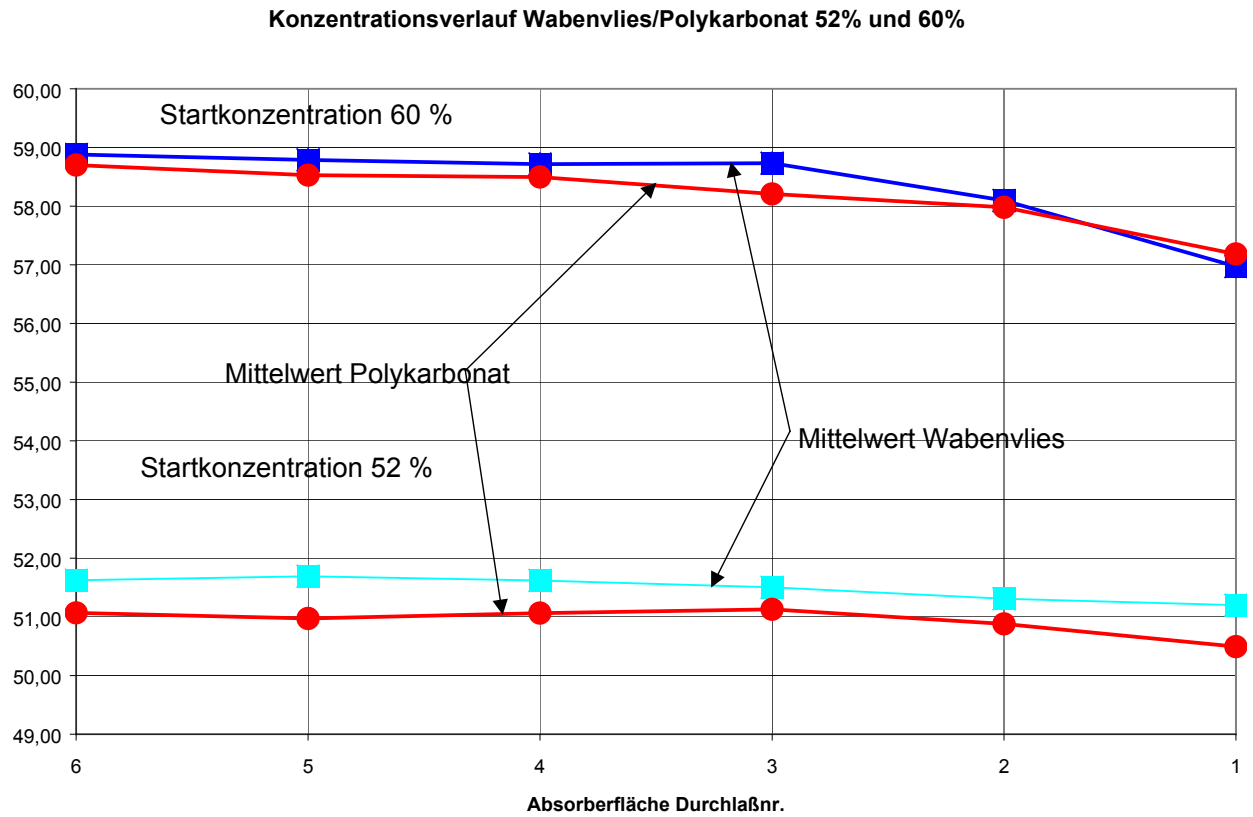


Abbildung 37: Vergleich der mittleren Konzentrationsverläufe der Wabenvliesoberfläche und der Polykarbonatoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 52 % und 60 %.

In nachfolgender Tabelle sind die im Text bereits beschriebenen minimalen, maximalen, sowie die durchschnittlichen Konzentrationsabnahmen der Sole zusammengefasst dargestellt.

Oberfläche	Anfangs-konzentration	Minimale	Maximale	Durchschnitt
		Konzentrationsabnahme		
Polykarbonat	60 %	0,7 %	3,75 %	1,8 %
Wabenvlies	60 %	0,7 %	4,2 %	1,5 %
Polykarbonat	52 %	0,5 %	1,75 %	1 %
Wabenvlies	52 %	~0 %	1,5 %	0,5 %

Tabelle 8: Übersicht der Konzentrationsabnahmen der Polykarbonat- und der Wabenvliesoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 52 % und 60 %

Zusammengefasst können bezüglich der Konzentrationsabnahme der Sole auf den beiden untersuchten Oberflächen in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit der Luft folgende Aussagen getroffen werden:

- Bei einer Startkonzentration von 60 % scheint im Vergleich die Oberfläche hinsichtlich der Abnahme der Solekonzentration keinen nennenswerten Einfluß zu haben.
- Der Verlauf der 60 % Startkonzentration ist im Vergleich zur 52 % Sole im ersten Drittel flacher, was durch den Kontakt mit unverdünnter Sole zu erklären ist, sodass das treibende Entfeuchtungspotential größer ist.
- Bei einer Startkonzentration von 52 % findet eine gleichmäßige horizontale Abnahme der Solekonzentration auf beiden Oberflächen statt.
- Die Verdünnung der Sole mit Wasser ist bei einer Startkonzentration von 52 % bei der Absorberoberfläche aus Polykarbonat geringfügig höher (1 %).
- Die durchschnittliche Abnahme der jeweiligen Startkonzentration ist mit 0,5 % bis 1,8 % sehr gering. Aus der geringen Konzentrationsabnahme lässt sich ein Kreislaufbetrieb der Sole ausschliessen, da die Sole so mit Wasser verdünnt ist, dass sie regeneriert werden muss, um das treibende Entfeuchtungspotential der hohen Konzentration aufrecht zu halten.

- Konstruktiv scheint es ausreichend zu sein, die absorptive Plattenlänge auf $\frac{1}{3}$ zu verkürzen, d.h. in diesem Versuchsaufbau auf $\sim 17\text{-}20\text{ cm}$, um bezüglich der Konzentrationsabnahme gleiche Werte zu erhalten.

Die geringe maximale durchschnittliche Konzentrationsabnahme der Sole von $K < 2\%$ zeigt, dass es in der praktischen Anwendung ausreichend ist, die Abnahme der Salinität der Sole an einer Stelle zu überwachen. Hierfür eignet sich z. B. ein Sammelbecken der Sole nach dessen Durchlaufen durch den Absorber.

Im nächsten Kapitel werden die gemessenen Temperaturen anhand der Temperaturbilder ausgewertet.

11.2 Temperaturverteilung auf der Platte

Um die Temperaturveränderungen auf der Absorberplatte nachzuvollziehen, wird die Absorberoberfläche durch 20 Thermoelemente in einem Rastermaß von $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ versehen. In den nachfolgenden Abbildungen auf der Seite 79 und Seite 80 befindet sich die eigentliche Messtelle der Temperatur genau in den Ecken der sich ausbildenden Quadrate. Die Zwischenbereiche in diesen Quadraten sind durch ein Programm interpoliert worden. In den Abbildungen sind die Aussagen so dargestellt, dass die Abbildungen die Ansichtsfläche der Absorberplatte wieder geben. Die Abbildungen werden aus den 20 gemessenen Temperaturen pro Überströmgeschwindigkeit dargestellt. Die zu entfeuchtende Luft strömt von rechts nach links, die Sole läuft von oben nach unten über die Doppelstegplatte, welche von unten nach oben mit Kühlwasser durchflossen wird (vergleiche Kapitel: 9 Versuchsaufbau). Die Interpretation der entstandenen Temperaturbilder ist schwierig, da sich die gemessene Temperatur aus folgenden einzelnen Temperaturen zusammensetzt:

- Sole (Eintrittstemperatur $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [von oben])
- Wandlung der latenten zur sensiblen Wärme durch den Aggregatswechsel
- Kühlwasser (Eintrittstemperatur $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [von unten])
- Luft (Eintrittstemperatur $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ [von rechts nach links])

Die Temperatur wurde durch ein Thermoelement gemessen, dessen Perle direkt mit der Absorberoberfläche Kontakt hatte (vergleiche Abbildung 32). Wie im Kapitel: 8 Ergebnisse der Voruntersuchung ersichtlich, entstanden während des Entfeuchterbetriebes Solebahnen auf der Absorberoberfläche. Da während der Messreihen die Absorberabdeckung mit einer Wärmedämmung versehen wurde, konnte nicht vorausgesagt werden, ob eine solche Thermoelementenperle die Temperatur in der Solebahn gemessen hat oder von der Solebahn nicht benetzt wurde. Dennoch sind auf den nachfolgenden Abbildungen interpretierbare Tendenzen zu erkennen, anhand derer folgende Aussagen getroffen werden können:

- Bei der Zunahme der Überströmgeschwindigkeiten der Zuluft wird der Einfluß der auf 32 °C temperierten Luft (Luftfeuchtigkeit $x=12 \text{ g/kg}_{\text{tr L}}$) auf die Erwärmung der Platte immer stärker. Ein je nach Überströmgeschwindigkeit immer größerer werdender Teil der Absorberplatte wird auf über 26 °C erwärmt. Bei einer Solekonzentration von 60 % (Abbildung 35 und Abbildung 36) beginnt diese Erwärmung der Platte über 26 °C bereits früher, da das Entfeuchtungspotential der höheren Konzentration stärker ist und damit verbunden mehr frei werdende sorptive Wärme diesen Erwärmungsprozess unterstützt.
- Bei gleicher Startkonzentration und gleicher Überströmgeschwindigkeit erscheinen bei der Wabenvliesoberfläche Bereiche (Abbildung 38 und Abbildung 40), die eine höhere Temperatur aufweisen. Dies ist durch die vermutete größere Verweildauer der Sole auf der Wabenvliesoberfläche zu erklären. Durch die längere Reaktionszeit zwischen Sole und Wasserdampf wird mehr latente Wärme zur sensiblen Wärme umgewandelt und trägt so zusätzlich zur Erwärmung bei.

Temperaturbilder der Wabenvliesoberfläche bei einer Solekonzentration von 52%:

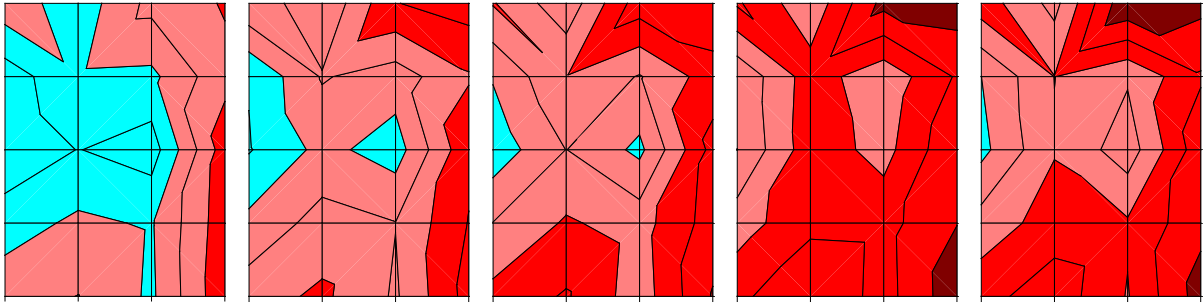


Abbildung 38: Wabenvliesoberfläche Solekonzentration 52 %
(von links nach rechts 1-5 m/s Überströmgeschwindigkeit der Luft)

Temperaturbilder der Polykarbonatoberfläche bei einer Solekonzentration von 52%:

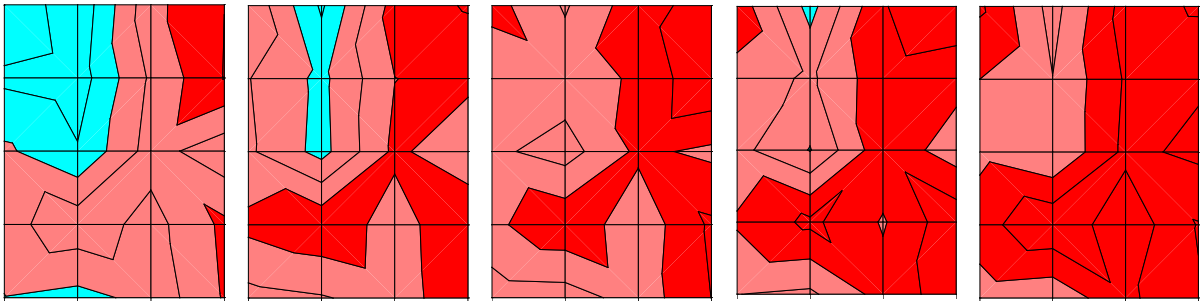
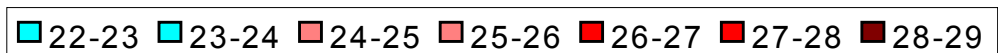


Abbildung 39: Polykarbonatoberfläche Solekonzentration 52 %
(von links nach rechts 1-5 m/s Überströmgeschwindigkeit der Luft)

Temperaturlegende:



Temperaturbilder der Wabenvliesoberfläche bei einer Solekonzentration von 60 %:

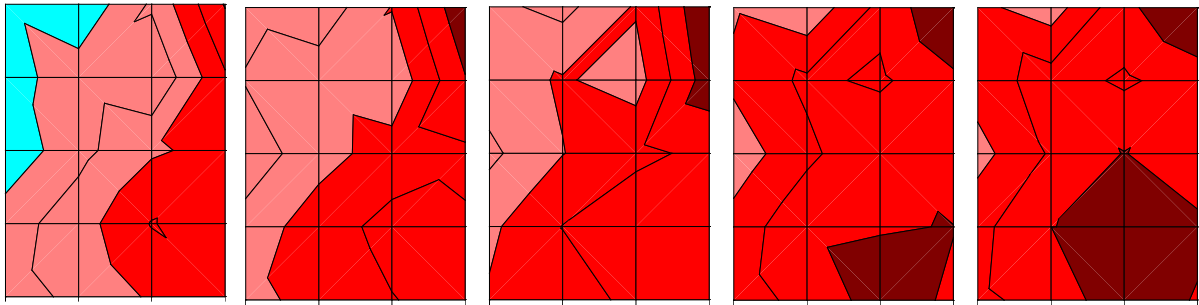


Abbildung 40: Wabenvliesoberfläche Solekonzentration 60 %
(von links nach rechts 1-5 m/s Überströmgeschwindigkeit der Luft)

Temperaturbilder der Polykarbonatoberfläche bei einer Solekonzentration von 60 %:

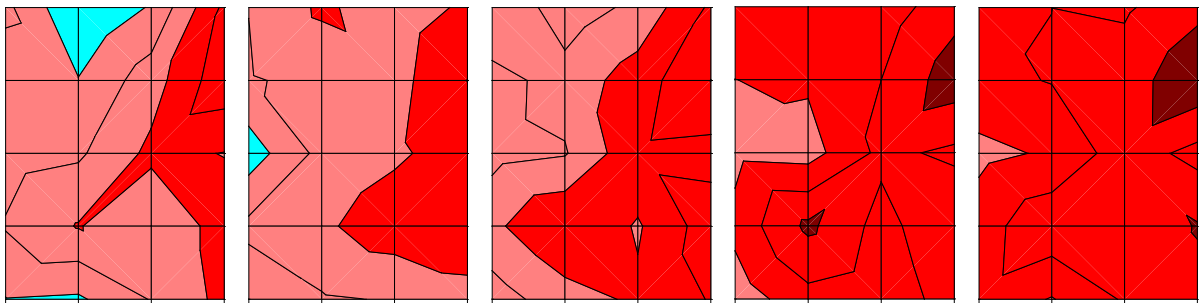
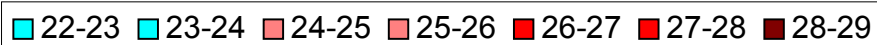


Abbildung 41: Polykarbonatoberfläche Solekonzentration 60 %
(von links nach rechts 1-5 m/s Überströmgeschwindigkeit der Luft)

Temperaturlegende:



Die Abbildungen sehen der Darstellung von Thermografieaufnahmen sehr ähnlich, dies ist kein Zufall sondern Absicht, da versucht wurde vergleichbare Ergebnisse mit einer Thermografiekamera zu erhalten. Die entstehenden Temperaturdifferenzen sind jedoch so gering, dass sie durch die ungedämmte transparente Abdeckung des Absorbers hindurch (vgl.: Kapitel 8.1.2) nicht gemessen werden konnten. Aus diesem Grund wurde diese Art der Temperaturmessung nicht weiter verfolgt.

Im nächsten Kapitel werden die entstehenden Druckverluste eingehender untersucht.

11.3 Druckverluste

In einer raumlufttechnischen Anlage setzen die einzelnen Komponenten der Luftbehandlungsfunktionen der durchströmenden Luft einen Widerstand entgegen, welche der Ventilator zusätzlich zur Überwindung der Widerstände des Kanalnetzes ausgleichen muss. Um den Ventilator und die erforderliche Antriebsleistung so klein wie möglich auslegen zu können, ist es notwendig, die Druckverluste der einzelnen Systembausteine kleinstmöglich zu halten. Aus diesem Grund wurden bereits bei dem vermessenen Prototypen die Druckverluste bei den unterschiedlichen Oberflächen und Überströmgeschwindigkeiten über den Absorber gemessen.

In der nachfolgenden Abbildung 42 sind die Druckverluste des untersuchten Kreuzströmers und der Druckverlust des von Röben [8] vermessenen Gegenströmers dargestellt. Röben stellte in seiner Arbeit fest, dass durch die sehr hohe dynamische Viskosität und die hohe Oberflächenspannung das hochkonzentrierte Klimat insbesondere beim Erhöhen der Luftgeschwindigkeit schlecht abläuft. Durch das Prinzip der gegeneinander geführten Massenströme von Luft und Sole führte dies zum Aufstauen des Sorptionsmittels Klimat und damit zu einer Verengung des Kanalquerschnittes [8]. Röben [8] folgert einen damit verbundenen erheblichen Anstieg des luftseitigen Druckwiderstandes schon bei geringen Überströmgeschwindigkeiten von 2 m/s. In der Abbildung 42 ist zu erkennen, dass auch die Trendlinie der Druckverluste dem typischen parabelförmigem quadratischen Verlauf folgen. Die Parallelität der Druckkurven zeigt bei beiden untersuchten Oberflächen des Kreuzströmers, dass der Einfluß der Konzentration der Sole auf den Druckverlust unbedeutend ist. Die geringere Solekonzentration von 52 % bewirkt bei beiden Oberflächen einen zwischen 5 und 10 % größeren Druckverlust als die Solekonzentration von 60 %. Der Unterschied der eingesetzten Oberflächen auf den Druckverlust ist bedeutender. Der Druckverlauf der Polykarbonatoberfläche ist im Vergleich zur Wabenvliesoberfläche flacher und die daraus resultierenden Druckverluste sind bei Überströmgeschwindigkeiten von 2 bis 5 m/s bis zu 24 % geringer.

11 Auswertung und Darstellung der Messergebnisse

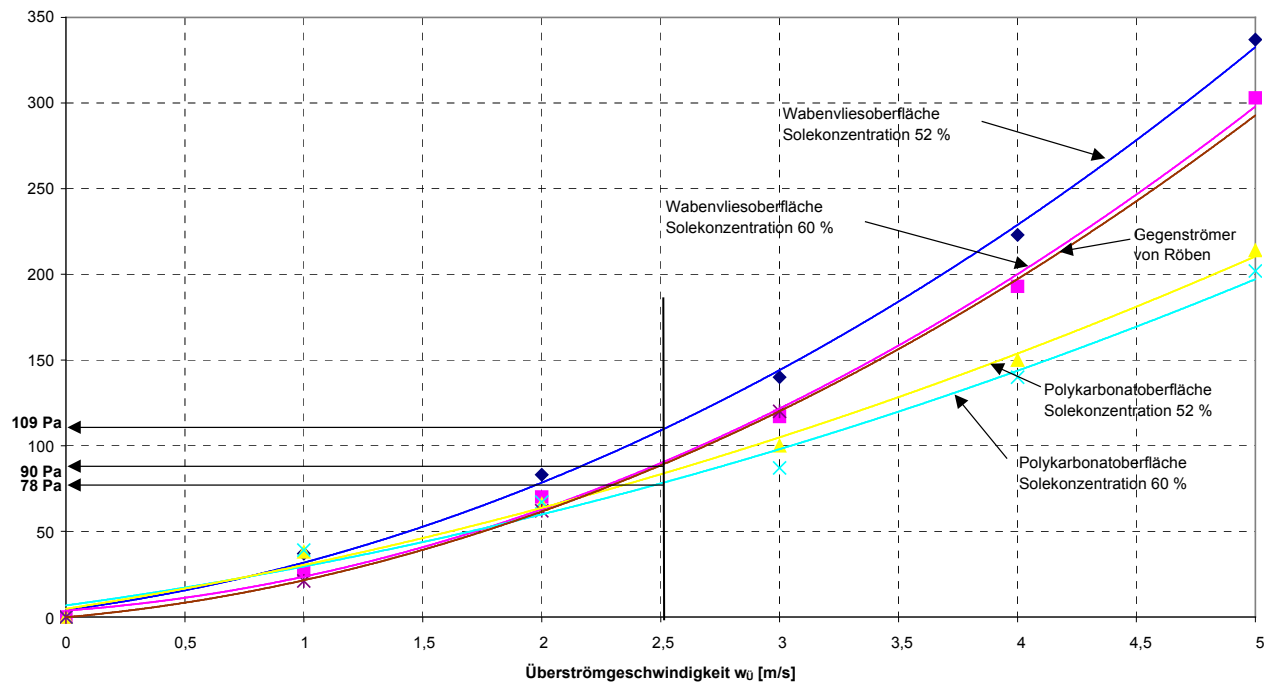


Abbildung 42: Druckverluste der vermessenen Absorberoberflächen in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit

In nachfolgender Tabelle 9 sind die Druckverluste im Vergleich des Gegenströmers, des Kreuzströmers und eines Sorptionsrades (z. B. Typ Secco Firma Klingenburg [35]) aufgezeigt:

Typ	Untersuchter Gegenströmer von Röben [8] Oberfläche: Vlies	Kreuzströmer Oberfläche: Polykarbonat	Sorptionsrad Typ Secco (Klingenburg) [35]
Druckverlust bei 2,5 [m/s]	90 Pa	80 Pa	100 Pa

Tabelle 9: Vergleich der Druckverluste von Entfeuchtern bei einer Luftgeschwindigkeit von 2,5 [m/s] in Abhängigkeit der Durchströmungsrichtung

Aus der Abbildung 42 und der Tabelle 9 ist deutlich zu erkennen, dass im Vergleich zu dem von Röben [8] vermessenem Gegenströmer und den Sorptionsrädern der Firma Klingenburg Typ Secco [35] die auftretenden Druckverluste bei dem in dieser Arbeit untersuchten Absorber (Kreuzstrom) in ähnlicher Größenordnung zu finden sind. Für größere Luftvolumenströme können in der Kreuzstromfahrweise mehrere entfeuchtende Platten parallel geschaltet werden, so dass sich bei gleichbleibender Überströmgeschwindigkeit die Druckverluste nicht ändern.

Im nächsten Kapitel wird die Leistungsfähigkeit beider Oberflächen hinsichtlich ihrer Entfeuchtungsbreite ausgewertet.

11.4 Entfeuchtungsbreiten

In diesem Kapitel wird die Entfeuchtungsbreite in Abhängigkeit der Oberfläche, der Solekonzentration und der Überströmgeschwindigkeit dargestellt und diskutiert.

Der Einfluss der Luftgeschwindigkeit über die Kontaktfläche auf die Entfeuchtungsbreite kann zur Beurteilung der Güte des Absorbers nur dann betrachtet werden, wenn die eingesetzte Solemenge bei beiden Absorberoberflächen gleich ist. Bei den durchgeführten Versuchen konnte der Solestrom nur in einer Bandbreite konstant gehalten werden, da durch die große Viskosität der Sole die Membranpumpe keine kontinuierliche Fördermenge aufwies. Dennoch können Aussagen über die Güte der Entfeuchtungsbreite getroffen werden, da Röben [8] in seiner Arbeit bereits feststellte, dass das Massenstromverhältnis bei Klimat einen geringeren Einfluss hat als z. B. bei einer wässrigen CaCl_2 -Lösung. Zur Beurteilung der Güte der Entfeuchtung von Absorbern führt Röben [8] das sogenannte Π -Verhältnis ein, das die eingesetzte Luftmenge ins Verhältnis zur der eingesetzten Solemenge setzt.

$$\Pi = \frac{\dot{M}_L}{\dot{M}_{\text{Sole}}}$$

Gleichung 19: Π -Verhältnis

Mit: Π = Massenstromverhältnis [-]

\dot{M}_L = Massenstrom der Luft [kg/m^3]

\dot{M}_{Sole} = Massenstrom der Sole [kg/m^3]

Die Bildung dieses Verhältnisses erlaubt in der Versuchsdurchführung eine Toleranz der Solemenge, da das Π -Verhältnis laut Definition, die verhältnismäßige Zusammensetzung von Luft und Sole wiedergibt. In der nachfolgenden Abbildung 43 ist das Π -Verhältnis gegenüber der Entfeuchtungsbreite aufgetragen. Die schattierten Felder geben den Bereich der jeweiligen Überströmgeschwindigkeiten bei den durchgeführten Versuchen wieder. Hätte die eingesetzte Solemenge durch die Membranpumpe konstant gehalten werden können, wären die Bereiche gleicher Überströmgeschwindigkeit senkrecht untereinander im Diagramm zu finden. In der Abbildung 43 fällt auf, dass der Bereich mit einer Überströmgeschwindigkeit von 2 m/s

nicht den parallelen Verlauf der anderen dargestellten Geschwindigkeitsbereiche aufweist. Diese Verschiebung ist durch die unregelmäßige Fördermenge der Membranpumpe zu erklären, die sich in den vorhergehenden Arbeiten (vgl.: [8], [37]) als die geeignetste Fördermöglichkeit für Klimat herausstellte.

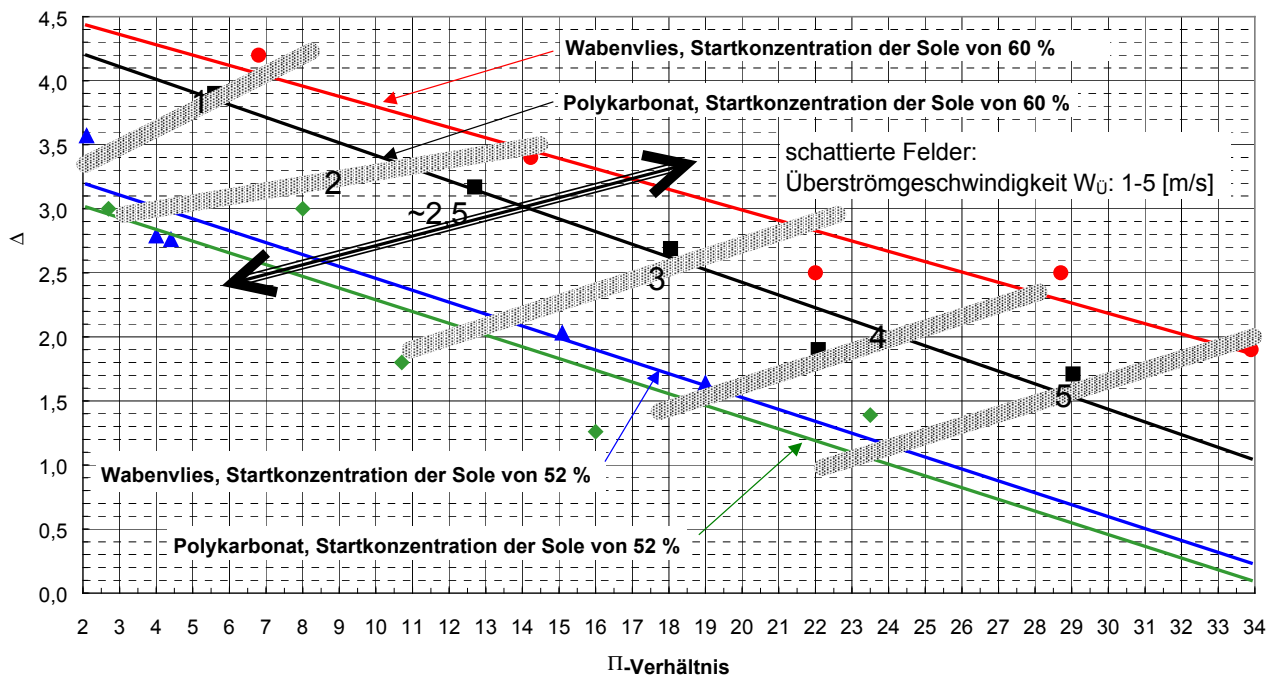


Abbildung 43 : Die Entfeuchtungsbreite des Absorbers in Abhängigkeit des II-Verhältnisses

In der nachfolgenden Abbildung 44 ist die Entfeuchtungsbreite gegenüber der Überströmgeschwindigkeit aufgetragen.

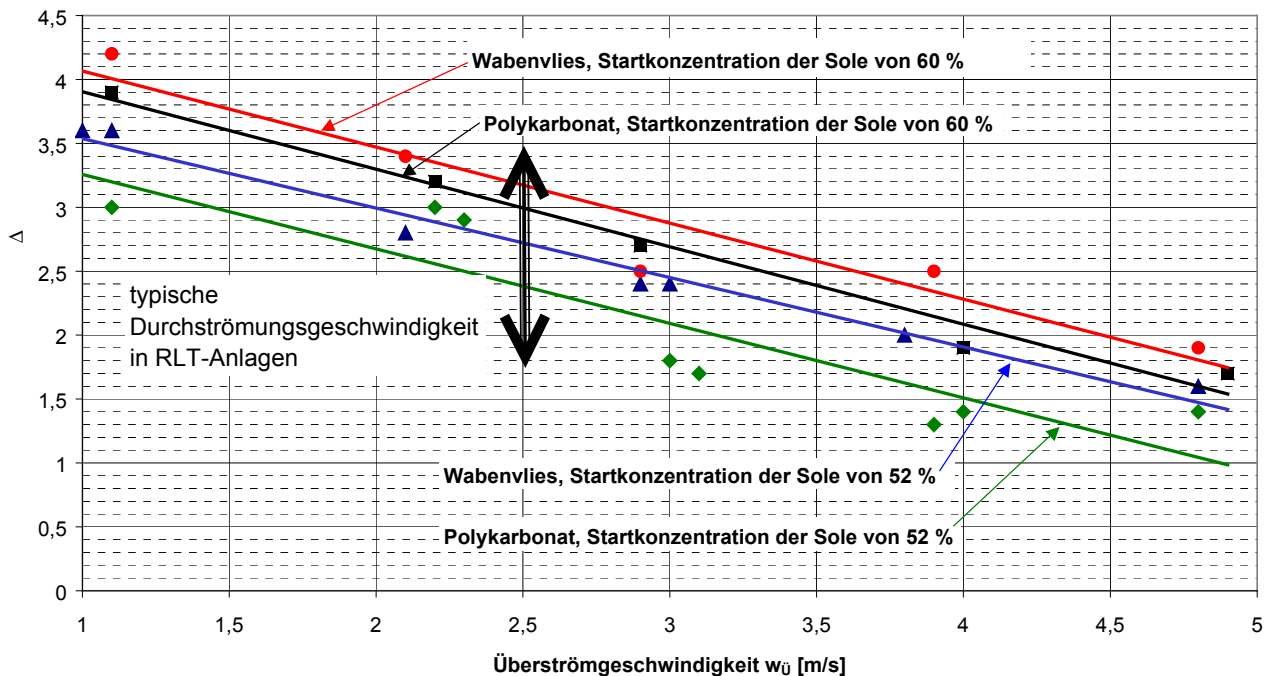


Abbildung 44 : Die Entfeuchtungsbreite des Absorbers in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit der Luft

Die zu gewinnenden Erkenntnisse über die Entfeuchtungsbreite in Abhängigkeit der Oberfläche, der Überströmgeschwindigkeit der Luft und der Anfangskonzentration der Sole sind aus der Abbildung 43 und der Abbildung 44 sehr ähnlich. Diese Ähnlichkeit bestärkt die Aussage von Röben [8] bezüglich des geringen Einflusses des Massenstromverhältnisses auf den Entfeuchtungsgrad bei der eingesetzten wässriger Salzlösung Klimat. Aus der Arbeit von Kourouma [37], der mit einem mit Klimat berieselttem Schneckenwärmeaustauscher experimentierte, ist diese Aussage auch zu entnehmen: Eine Verdreifachung des Solestromes erbrachte nur eine Leistungssteigerung des absorbierten Wassermassenstromes von 25 %. Kourouma [37] misst bei seiner Analyse sogar dem Luftmassenstrom keine nennenswerte Bedeutung bei, da laut Patnaik [51] bei der Absorption der Stoffübergangswiderstand auf der Salzlösungsseite bei 70 - 80 % des Gesamtwiderstandes liegt.

Bei dem Vergleich der Ergebnisse der beiden untersuchten Oberflächen in der Abbildung 43 und der Abbildung 44 fällt auf, dass bei steigender Überströmgeschwindigkeit die Entfeuchtungsbreite der Absorber sinkt. Die gemessene Entfeuchtungsbreite ist bei den Konzentrationen von 52 % und 60 %, sowie bei den variierenden Überströmgeschwindigkeiten von 1 bis 5 m/s bei dem Absorber mit der Wabenvliesoberfläche, größer als bei dem Absorber, der mit der Polykarbonatoberfläche betrieben wurde. Durch die Messwerte wurde jeweils eine

Trendlinie gelegt, deren Verlauf bei allen Konzentrationen fast parallel ist. Eine Überströmgeschwindigkeit von 2,5 m/s ist eine in der Praxis übliche Durchströmungsgeschwindigkeit von Klimazentralgeräten. Wird diese Luftgeschwindigkeit zum Vergleich zugrunde gelegt, so ist die Entfeuchtungsleistung der Wabenvliesoberfläche bei einer eingesetzten Anfangskonzentration der Sole von 60 % um 6 % größer als bei der Polykarbonatoberfläche. Dieses Ergebnis lässt sich auch aus der Abbildung 44 ablesen, in der die Luftgeschwindigkeit gegenüber der Entfeuchtungsbreite aufgetragen ist. Bei einem gleichen Π -Verhältnis (Abbildung 43) von 16, dies entspricht hier in etwa der Luftgeschwindigkeit von 2,5 m/s, liegt die Entfeuchtungsleistung um 6 % höher als bei der Oberfläche aus Polykarbonat. Bei einer Solekonzentration von 52 % sind die Ergebnisse aus beiden Abbildungen nicht gleich. In der Abbildung 44 liegt die größere Entfeuchtungsleistung der Wabenvliesoberfläche bei einer Luftgeschwindigkeit von 2,5 m/s bei 12 % gegenüber der Entfeuchtungsleistung der Polykarbonatoberfläche. Die lässt sich aus den Ergebnissen der Abbildung 43 nicht bestätigen. Hier liegt die Differenz der Entfeuchtungsbreite bei einer Startkonzentration von 52 % und einem vergleichbarem Π -Verhältnis von 8 bei 3 % zugunsten der Wabenvliesoberfläche. Diese Differenz ist durch eine Messungenauigkeit zu erklären.

Als Übersicht sind in nachfolgender Tabelle 10 die Entfeuchtungsbreiten in Abhängigkeit der Oberfläche des Absorbers und der Anfangskonzentration der Sole für die Geschwindigkeiten 1, 2,5 und 5 m/s dargestellt. Bezogen auf die typische Durchströmungsgeschwindigkeit von RLT-Anlagen von 2,5 m/s ist der Wert für das zugehörige Π -Verhältnis unterstrichen aufgetabelliert.

Oberfläche [-]	Anfangs- Konzentration Der Sole K [%]	Überström- geschwindigkeit w _Ü			Massenstrom- verhältnis Π [-] bezogen auf 2,5 m/s
		1 m/s	2,5m/s	5 m/s	
		Entfeuchtungsbreite Δx [g _w /kg _{tr L}]			
Polykarbonat	52	3	<u>2,5</u>	1,1	<u>8</u>
Wabenvlies	52	3,2	<u>2,7</u>	1,2	<u>9</u>
Polykarbonat	60	4,2	<u>3</u>	1,5	<u>14</u>
Wabenvlies	60	4,4	<u>3,2</u>	1,8	<u>17</u>

Tabelle 10: Entfeuchtungsbreite Δx [g/kg] in Abhängigkeit der Oberfläche des Absorbers und der Anfangskonzentration der Sole für die Geschwindigkeiten 1; 2,5 und 5 m/s

Die Berechnung der Entfeuchtungsbreite Δx [kg_w/kg_{tr L}] ist für die untersuchten Absorber in Abhängigkeit der jeweiligen Anfangskonzentration der Sole von 52 % oder 60 % durch nachfolgende Geradengleichungen möglich, je nachdem ob das Π -Verhältnis (Gleichung 20) oder die Überströmgeschwindigkeit $w_{\text{Ü}}$ (Gleichung 21) bekannt ist.

$$x = \frac{m_1 \times \Pi + c_1}{1000}$$

Gleichung 20: Geradengleichung der Entfeuchtungsbreite Δx
in Abhängigkeit des Π -Verhältnisses

Mit: Δx = Entfeuchtungsbreite [kg_w/kg_{tr L}]

m_1 = Steigung der Geraden [-]

Π = Massenstromverhältnis [-]

c_1 = Berechnungskonstante [-]

Der Gültigkeitsbereich für das Π -Verhältnis liegt zwischen $2 \leq \Pi \leq 34$.

$$x_{\text{in}} = \frac{m_2 \times w_{\text{Ü}} + c_2}{1000}$$

Gleichung 21: Geradengleichung der Entfeuchtungsbreite Δx
Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit $w_{\text{Ü}}$

Mit: Δx = Entfeuchtungsbreite [$\text{kg}_W/\text{kg}_{\text{tr L}}$]
 m_2 = Steigung der Geraden [-]
 $w_{\text{Ü}}$ = Überströmgeschwindigkeit der Absorberplatte [m/s]
 c_2 = Berechnungskonstante [-]

Der Gültigkeitsbereich für die Überströmgeschwindigkeit liegt zwischen $1 \text{ m/s} \leq w_{\text{Ü}} \leq 5 \text{ m/s}$.

Die Zahlenwerte für die jeweilige Steigung m_1 oder m_2 und die Berechnungskonstante c_1 oder c_2 können der nachfolgenden Tabelle 11 entnommen werden.

Oberfläche	Anfangs- konzentration der Sole K	II-Verhältnis		Überström- Geschwindigkeit	
		Steigung m_1	Konstante c_1	Steigung m_2	Konstante c_2
[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]
Polykarbonat	52	-0,0916	3,2061	-0,5823	3,8385
Wabenvlies	52	-0,039	3,3874	-0,543	4,0792
Polykarbonat	60	-0,0991	4,4081	-0,6065	4,5115
Wabenvlies	60	-0,0806	4,6033	-0,5949	4,6609

Tabelle 11: Berechnungskonstanten c_n und m_n für die Entfeuchtungsbreite Δx [g/kg] der untersuchten Absorber in Abhängigkeit der Anfangskonzentration der Sole.

Gültigkeitsbereich $2 \leq \Pi \leq 34 \geq$ oder $1 \text{ m/s} \leq w_{\text{Ü}} \leq 5 \text{ m/s}$

Zusammengefasst ist die Entfeuchtungsleistung der Wabenvliesoberfläche bei der typischen Durchströmungsgeschwindigkeit von 2,5 m/s um 6 % größer, als bei der beschichteten Polykarbonatoberfläche. In absoluten Werten bedeutet dies, dass der Luft bei einer Anfangskonzentration der Sole von 60 % und einer Überströmgeschwindigkeit von 2,5 m/s der Luft, mit dem Plattenabsorber und der

Wabenvliesoberfläche $\Delta x = 3,2 \text{ g}_W/\text{kg}_{\text{tr L}}$ und mit der Polykarbonatoberfläche $\Delta x = 3,0 \text{ g}_W/\text{kg}_{\text{tr L}}$ Wasser entzogen werden können. Eine Erklärung für die bessere Entfeuchtungsbreite der Wabenvliesoberfläche, trotz der im Kapitel: 8 „Ergebnisse der Voruntersuchung“ gezeigten geringeren benetzten Oberfläche, könnte in der Ablaufgeschwindigkeit der Solemenge auf der glatteren Polykarbonatoberfläche zu finden sein. Die Ablaufgeschwindigkeit der Sole gibt anschaulich nachvollziehbar die jeweilige Kontaktzeit zwischen Luft und der entfeuchtenden Sole wieder.

Im anschließenden Kapitel werden die Versuchsergebnisse der Entfeuchtungsgrade mit den Ergebnissen der an der Universität Essen untersuchten Absorber verglichen, hierfür wird zunächst der Austauschgrad (Entfeuchtungsgrad) bestimmt, der das Verhältnis zwischen realer Entfeuchtung und theoretisch maximaler Entfeuchtung darstellt.

11.4.1 Entfeuchtungsgrad

Der Entfeuchtungsgrad ε_A gibt das Verhältnis zwischen realer Entfeuchtungsdifferenz und theoretisch maximaler Entfeuchtungsdifferenz wieder und ist wie folgt definiert:

$$\varepsilon_A = \frac{x_{\text{ein}} - x_{\text{au}}}{x_{\text{ein}} - x_s}$$

Gleichung 22: Entfeuchtungsgrad [39]

Mit: ε_A = Entfeuchtungsgrad [%]

x_{ein} = Eintrittsfeuchte der Luft [$\text{kg}_W/\text{kg}_{\text{tr L}}$]

x_{au} = Austrittsfeuchte der Luft [$\text{kg}_W/\text{kg}_{\text{tr L}}$]

x_s = Sättigungswassergehalt des Sorbens [$\text{kg}_W/\text{kg}_{\text{tr L}}$]

Der Sättigungswassergehalt x_s des Sorbens ist der theoretisch maximal mögliche Wassergehalt, den die wässrige Salzlösung aufnehmen kann und ist eine Funktion der Temperatur und der Konzentration der Salzlösung. Die Taupunkttemperatur der Salzlösung lässt sich durch nachfolgenden Gleichung berechnen, die empirisch von Lävemann u.a. [39] entwickelt wurde.

$$T_{\text{Tau}} = \frac{T_{\text{Sorbens}}}{1 + w \times \left(\frac{a \times y_{\text{ein}}}{1 - y_{\text{ein}} + a \times y_{\text{ein}}} \right)^3}$$

Gleichung 23: Taupunkttemperatur [39]

Mit: T_{Tau} = Taupunkttemperatur des Sorbens hier Klimat [K]

T_{Sorbens} = Temperatur des Sorbens hier Klimat [K]

a = Korrekturfaktor für Taupunkt [-]

w = Korrekturfaktor für Taupunkt [-]

y_{ein} = Solekonzentration [1/100]

Die Korrekturfaktoren a und w sind in Tabelle 12 für das Sorbens Klimat zu finden. Die Variable y_{ein} gibt die jeweilige Konzentration der Salzlösung wieder.

Variable	A	w
Klimat 3990 S	1,287	0,333

Tabelle 12: Koeffizienten von Lävemann u.a. [39] für die Berechnung der Taupunkttemperatur von Klimat 3990 S

Mit der Taupunkttemperatur aus Gleichung 23 und dem Sättigungspartialdruck des Sorbens aus Gleichung 24 oder Gleichung 25 kann nun durch Einsetzen in die Gleichung 26 der Sättigungswassergehalt des Sorbens berechnet werden. Gleichung 24 gilt für einen Temperaturbereich von 0,01°C bis 70°C und Gleichung 25 für einen Temperaturbereich von –50°C bis 0,01°C.

$$p_{s(t)} = 100 \times e^{(19,016 - \frac{4064,95}{t+236,25})}$$

Gleichung 24: Sättigungspartialdruck [52]

Mit: $p_{s(t)}$ = Sättigungspartialdruck [Pa]

t = Temperatur [°C], (Gültigkeitsbereich 0,01°C – 70 °C)

$$p_{s(t)} = 611,657 \times e^{(22,5090 \times (1 - \frac{273,16}{T}))}$$

Gleichung 25: Sättigungsdruck [52]

Mit: $p_{s(t)}$ = Sättigungspartialdruck [Pa]

T = Temperatur [K], (Gültigkeitsbereich -50°C bis $-0,01^{\circ}\text{C}$)

Der theoretisch minimal zu erreichende absolute Wassergehalt der Luft x_s am Austritt des Absorbers, berechnet sich durch das Verhältnis der Gaskonstanten von trockener Luft R_L und Wasserdampf R_W , sowie des Verhältnisses des Sättigungspartialdruckes $p_{s(t)}$ zur Differenz zum Umgebungsdruck p_{ges} .

$$x_s = 0,622 \times \frac{p_{s(t)}}{p_{\text{ges}} - p_{s(t)}}$$

Gleichung 26 [13]

Mit: x_s = Sättigungswassergehalt (hier des Sorbens) [$\text{kg}_W/\text{kg}_{\text{tr L}}$]

$p_{s(t)}$ = Sättigungspartialdruck [Pa]

p_{ges} = Umgebungsdruck [Pa]

R_L/R_W = Verhältnis der Gaskonstanten von Luft und Wasser = 0,622

11.4.1.1 Entfeuchtungsgrad in Abhängigkeit des Massenstromverhältnisses

Die mit der Gleichung 22 berechneten Entfeuchtungsgrade ε_A der untersuchten Absorber sind in nachfolgender Abbildung 45 in Abhängigkeit des Massenstromverhältnisses der Luft zur Sole dargestellt. Zum Vergleich der an der Universität Essen untersuchten Absorber sind in der Abbildung 45 die erreichten Entfeuchtungsgrade von Röben [8] und Kourouma [37] mit eingefügt worden. Alle drei Absorber wurden mit Klimat und einer Startkonzentration von 60 % betrieben. Als vergleichbares Kriterium wurde die Überströmgeschwindigkeit von $\sim 1 \text{ m/s}$ gewählt, da für größere Überströmgeschwindigkeiten für den Rohrwendelabsorber von Kourouma [37] keine weiteren Daten vorliegen. Trotz der unterschiedlichen Eintrittsfeuchten in die Absorber können die erreichten Entfeuchtungsgrade mit einander verglichen werden, da als Parameter das Massenstromverhältnis Π in der Abbildung 45 zugrunde gelegt wird.

In dem Versuchsaufbau von Kourouma werden die mit Kühlwasser durchflossenen Rohrwendel mit Klimat benetzt, die Luft wird wie im Versuchsaufbau von Rößen im Gegenstrom geführt. Die Austauschfläche im Rohrwendelabsorber wurde der Oberfläche des Rohrwendels gleichgesetzt. Die Austauschfläche des Plattenabsorbers wurde auf die aktive Austauschfläche des Salzes reduziert. In der Abbildung 45 sind anhand der Messwerte Trendlinien gebildet worden, die die Zusammenhänge zwischen dem Entfeuchtungsgrad, der Oberflächen und Eintrittskonzentration der Sole besser erkennen lassen. Der Entfeuchtungsgrad nimmt mit zunehmendem Π -Verhältnis bei allen untersuchten Absorbern ab. Bei dem untersuchten Rohrwendelabsorber von Kourouma [37] fällt auf, dass das Massenstromverhältnis den Entfeuchtungsgrad stärker beeinflusst als bei den verglichenen Plattenabsorbern.

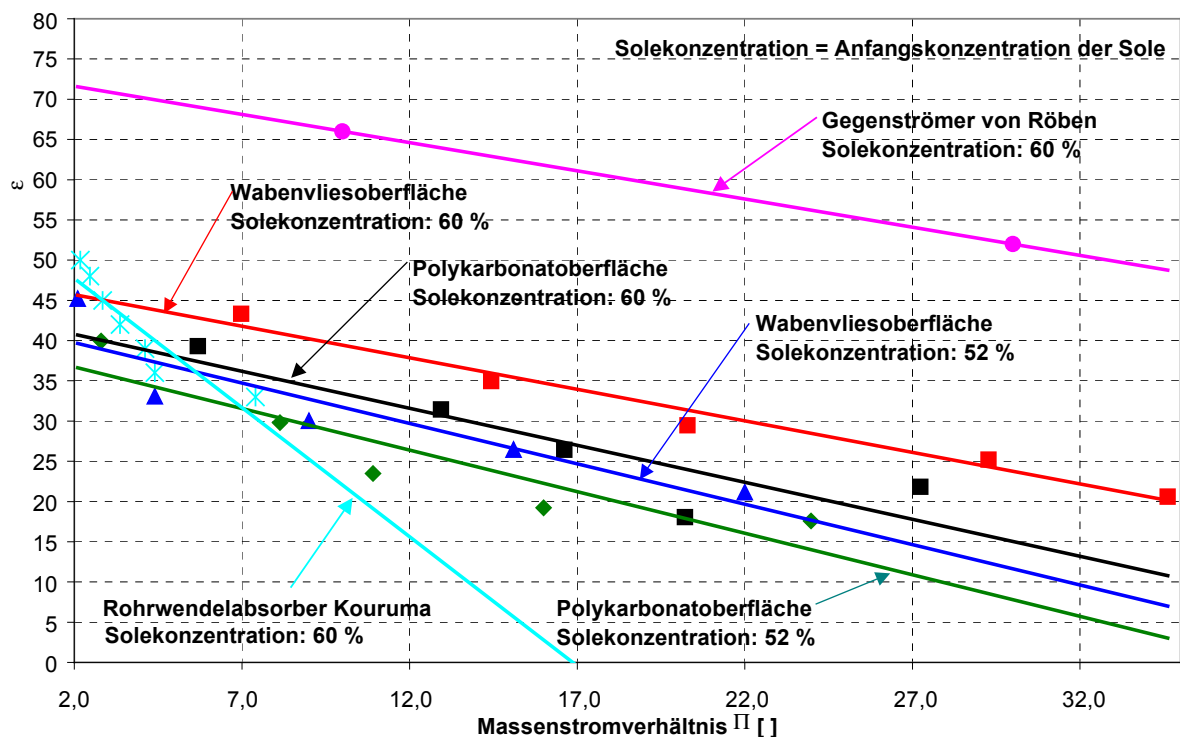


Abbildung 45: prozentualer Entfeuchtungsgrad in Abhängigkeit des Massenstromverhältnisses der untersuchten Absorberoberflächen und Eintrittskonzentrationen der Sole.

Den größten Entfeuchtungsgrad wird mit dem Plattenabsorber in Gegenstromfahrweise von Röben [8] erreicht. Die Entfeuchtungsleistung und der Entfeuchtungsgrad des Gegenströmers sind im Vergleich zum Kreuzströmer fast doppelt so groß (vgl.: Abbildung 45 und Tabelle 13).

Beim Vergleich der Entfeuchtungsgrade ist es wichtig zu wissen, dass der rechnerische Einfluß der Soletemperatur auf den Entfeuchtungsgrad (vgl.: Gleichung 22 - Gleichung 26) in einem fast linearem Zusammenhang steht:

Steigt die Soletemperatur um einen Kelvin, so steigt auch der Entfeuchtungsgrad um einen Prozentpunkt an. Kourouma und Röben haben eine mittlere Temperatur zwischen Eintritt und Austritt der Sole bei der Berechnung der Entfeuchtungsgrade zugrunde gelegt. Bei der Berechnung der Entfeuchtungsgrade wurde in dieser Arbeit die Soleeintrittstemperatur von 20°C herangezogen, da die Soletemperatur auf der Absorberplatte bei diesem Absorber nicht ermittelt werden konnte (vgl. Kapitel: 11.2 „Temperaturverteilung auf der Platte“).

In der nachfolgenden Tabelle 13 sind die experimentell untersuchten Absorber mit ihren vergleichbaren Eintrittsbedingungen zusammengefaßt.

Typ: Lufteintrittstemperatur: Sole: Konzentration	~32°C Klimat 60 %	Rohrwendel- absorber Kouruma [37]	Plattenabsorber	
			Gegenströmer Röben [8]	Kreuzströmer/Oberfläche
				Wabenvlies Polykarbonat
Austauschfläche [m²]		0,3	1,08	0,06 0,09
Eintrittsfeuchte [g _w /kg _{tr. L}]		27	14	12 12
II-Verhältnis [-]		2,5	10	6,8 5,6
Soletemperatur [°C]		27	25	20 20
Überströmgeschwindigkeit [m/s]		0,7	1	1,1 1,1
Entfeuchtungsbreite [g _w /kg _{tr. L}]		9,7	7,7	4,2 3,9

Tabelle 13: Vergleich der Entfeuchtungsbreiten der an der Universität Essen untersuchten Absorbern mit vergleichbaren Eintrittsbedingungen

11.4.1.2 Entfeuchtungsgrad in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit

In der Abbildung 43, deren Verlauf der Trendlinien denen aus der Abbildung 45 ähnelt, ist als Referenzgeschwindigkeit 2,5 m/s gewählt worden, da diese Überströmgeschwindigkeit der typischen Durchströmungsgeschwindigkeit von Klimazentralgeräten entspricht. Wird diese Geschwindigkeit bei der Auswertung des Entfeuchtungsgrades zugrunde gelegt, entsprechen 2,5 m/s Überströmgeschwindigkeit einem Π -Verhältnis von 8, bei einer Solekonzentration von 52 %. Bei dieser Konzentration der Sole hat die Wabenvliesoberfläche einen um 13 % besseren Entfeuchtungsgrad gegenüber der Polykarbonatoberfläche. Bei der Solekonzentration von 60 % und einem Π -Verhältnis von 17 -entsprechend der typischen Überströmgeschwindigkeit- ist der Entfeuchtungsgrad der Wabenvliesoberfläche um 22 % besser als der Entfeuchtungsgrad der Polykarbonatoberfläche. Im Mittel liegen bei beiden Oberflächen und Konzentrationen die Entfeuchtungsgrade um ca. 30 %. Bei sehr kleinem Π -Verhältnis von 2 und Überströmgeschwindigkeiten um 1 m/s liegt der maximal erreichte Entfeuchtungsgrad bei 45 %.

Die Darstellung der Entfeuchtungsgrade in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit in der Abbildung 46 erbrachte keine so signifikanten Unterschiede wie die Darstellung der Entfeuchtungsbreite gegenüber dem Massenstromverhältnis. Die gebildeten Trendlinien sind so über alle Messwerte unabhängig von der Absorberoberfläche und der Konzentration gebildet worden. Die lineare Abnahme der Entfeuchtungsbreite von 5 % je zunehmender Überströmgeschwindigkeit pro m/s ist deutlich zu erkennen.

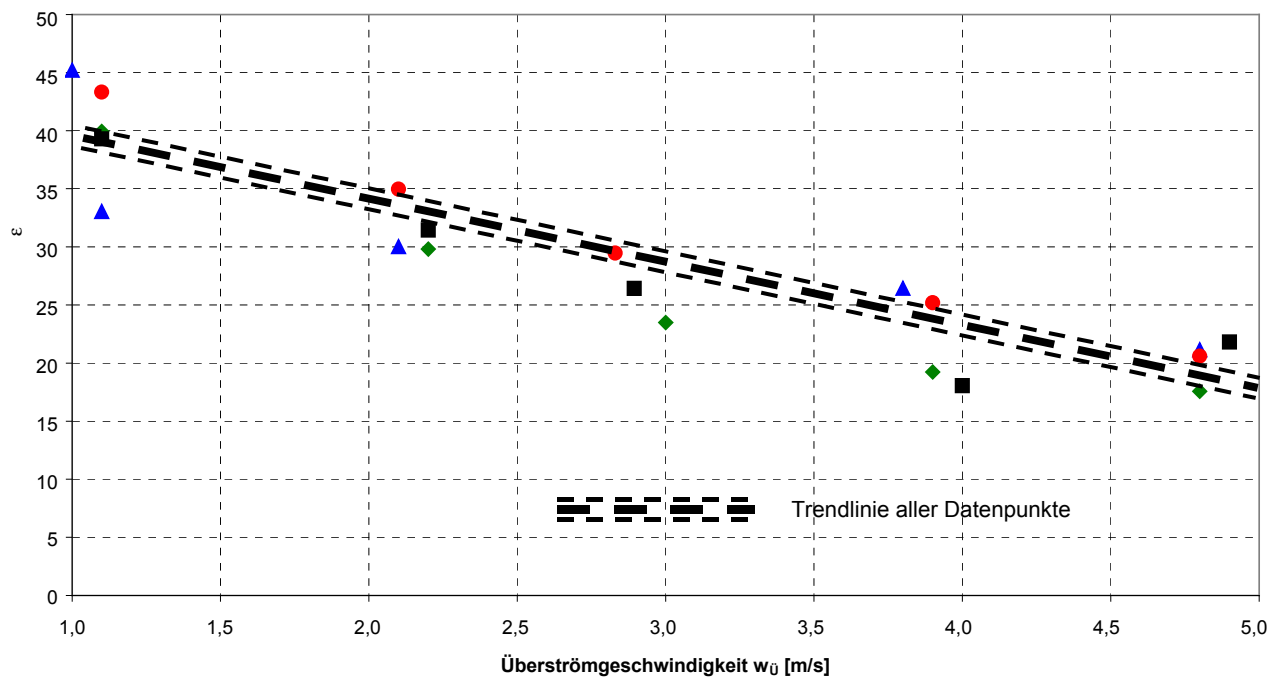


Abbildung 46: prozentualer Entfeuchtungsgrad in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit unabhängig der Absorberoberflächen und Eintrittskonzentrationen der Sole

Die erreichten Entfeuchtungsgrade unterhalb von 50 % zeigen, dass hinsichtlich der maximal zu erreichenden Entfeuchtung bei einem Kreuzströmer weitere Entwicklungsarbeit notwendig ist.

Im nächsten Kapitel werden die sich aus den Messwerten ergebenden Wärme- und Stoffübergänge dargestellt.

11.5 Wärme- und Stoffübergang

In diesem Kapitel werden die Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten dargestellt, die sich durch die gemessenen Temperaturen und Stoffübergänge ergeben. Diese Koeffizienten sind notwendig, um diese Art von Entfeuchter auslegen zu können.

11.5.1 Stoffübergangskoeffizient

Der Stoffübergangskoeffizient $\beta_{L, \text{Sole}}$ von der Luft zur Sole lässt sich anschaulich durch die gemessenen Werte des Massenstromes der Luft \dot{m}_L , der entzogenen Wassermenge Δx pro benetzter Absorberfläche $A \times b_g$ (vgl.: Kapitel 8.2) durch folgenden Zusammenhang darstellen:

$$\beta_{L, \text{Sole}} = \frac{\Delta x \times \dot{m}_L \times 100}{\rho_L \times A \times b_g} \quad \text{Gleichung 27}$$

Mit: $\beta_{L, \text{Sole}}$ = Stoffübergangskoeffizient von der Luft zur Sole [m/s]

Δx = absolute Feuchtedifferenz [kg_w/kg_{tr L}]

\dot{m}_L = Massenstrom der Luft [kg/s]

ρ_L = Dichte der Luft [kg/m³]

A = Absorberfläche [m²]

b_g = Benetzungsgrad [%], (vgl.: Tabelle 4)

In der nachfolgenden Abbildung 47 ist der Stoffübergangskoeffizient $\beta_{L, \text{Sole}}$ zur Überströmgeschwindigkeit $w_{\text{Ü}}$ für die untersuchten Absorberoberflächen und der Anfangskonzentration der Sole von 52 % und 60 % aufgetragen. Der Stoffübergangskoeffizient $\beta_{L, \text{Sole}}$ steigt mit zunehmender Überströmgeschwindigkeit $w_{\text{Ü}}$ für die jeweiligen Oberflächen und Anfangskonzentrationen stetig an. Der Stoffübergangskoeffizient ist bei der Wabenvliesoberfläche und einer Anfangskonzentration der Sole von 60 % am größten. Bemerkenswert ist, dass der Stoffübergangskoeffizient bei der Wabenvliesoberfläche und einer Anfangskonzentration der Sole von 52 % größer ist, als bei der Polykarbonatoberfläche und einer Anfangskonzentration der Sole von 60 %.

Aus dieser Aussage folgt, dass neben der Anfangskonzentration der Sole auch die Wahl der Absorberfläche für den Stoffübergangskoeffizienten und demzufolge den Entfeuchtungsgrad von Bedeutung ist.

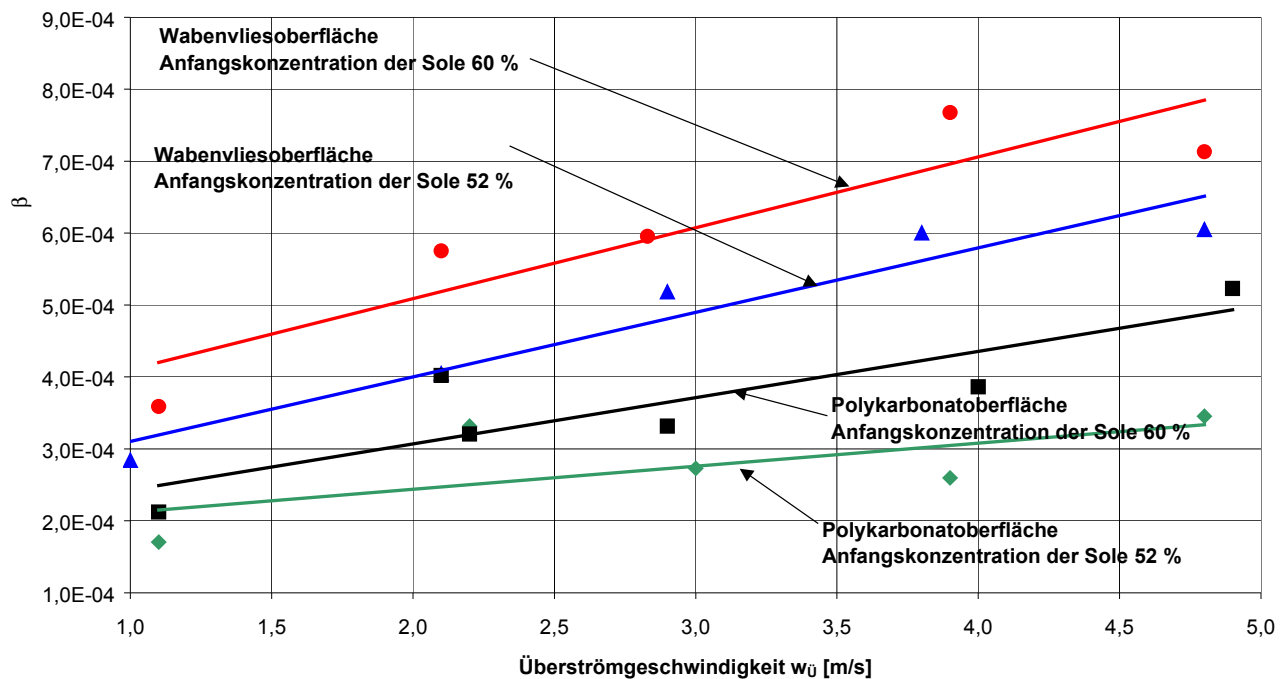


Abbildung 47: Der Stoffübergangskoeffizient $\beta_{L, \text{Sole}}$ im Verhältnis zur Überströmgeschwindigkeit $w_{\text{Ü}}$

Im nächsten Kapitel wird der sich an diesem Absorber ergebene Wärmedurchgangskoeffizient $k_{L, \text{KW}}$ von der Luft zum Kühlwasser dargestellt.

11.5.2 Wärmedurchgangskoeffizient $k_{L, \text{KW}}$

Es sind zwei baugleiche Absorber (vgl.: Kapitel 8.2) untersucht worden, die sich nur durch das Material der Doppelstegplatten unterscheiden. Die Doppelstegplatte des Absorber I besteht aus Polypropylen, auf das ein Vlies mit einer wabenartigen Struktur festgeschweißt wurde. Der Absorber II besteht aus einer reinen Polykarbonatplatte, die auf der einen Seite mit einer wasserspreitenden Schicht versehen ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Materialien der Doppelstegplatten der Absorber, ergeben sich zwei Wärmedurchgangskoeffizienten, die sich mit Hilfe der nachfolgenden schematischen Darstellung der Schichten des Absorbers in Abbildung 48 ermitteln lassen.

11 Auswertung und Darstellung der Messergebnisse

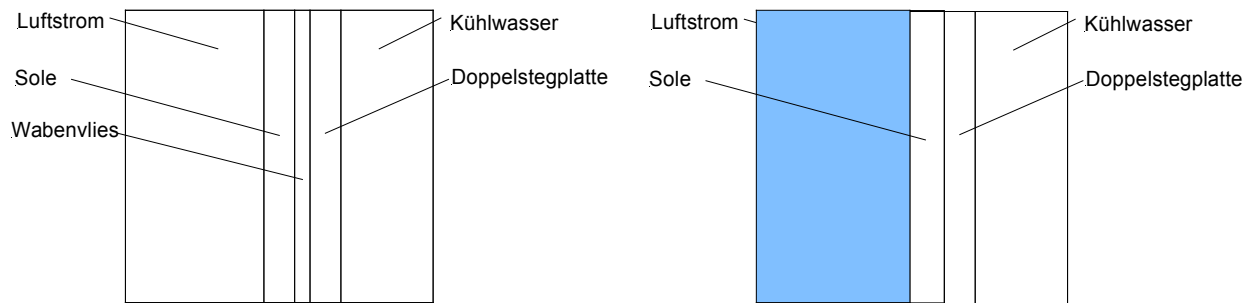


Abbildung 48: Schematische Darstellung der Schichten zwischen Luft und Kühlwasser für die beiden untersuchten Absorber: links Absorber mit Wabenvliesoberfläche, rechts Absorber mit wasserspreitenden Polykarbonatoberfläche

Für den Absorber aus Polypropylen und Wabenvlies (vgl.: Abbildung 48 links):

$$k_{L,Kw,PP} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{L, Sole}} + \frac{s_{Sole}}{\lambda_{Sole}} + \frac{1}{\alpha_{Sole, V}} + \frac{s_V}{\lambda_V} + \frac{s_{PP}}{\lambda_{PP}} + \frac{1}{\alpha_{PP, Kw}}}$$

Gleichung 28

Mit: $k_{L, Kw, PP}$ = Wärmedurchgangskoeffizient von der Luft zum Kühlwasser für den Absorber aus Polypropylen und der Wabenvliesoberfläche [W/m^2K]

$\alpha_{L, Sole}$ = Wärmeübergangskoeffizient zwischen Luft und Sole [W/m^2K]

s_{Sole} = Schichtdicke der Sole [m]

λ_{Sole} = Wärmeleitfähigkeit der Sole [W/mK]

$\alpha_{Sole, V}$ = Wärmeübergangskoeffizient Sole und Vlies [W/m^2K]

s_V = Schichtdicke des Wabenvlieses [m]

λ_V = Wärmeleitfähigkeit des Wabenvlieses [W/mK]

s_{PP} = Schichtdicke der Doppelstegplatte aus Polypropylen [m]

λ_{PP} = Wärmeleitfähigkeit der Doppelstegplatte aus Polypropylen [W/mK]

$\alpha_{PP, Kw}$ = Wärmeübergangskoeffizient zwischen Doppelstegplatte und Kühlwasser für den Absorber mit der Wabenvliesoberfläche [W/m^2K]

Für den Absorber aus der Polycarbonatplatte (vgl.: Abbildung 48 rechts):

$$k_{L,Kw,PC} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{L,Sole}} + \frac{s_{Sole}}{\lambda_{Sole}} + \frac{1}{\alpha_{Sole,PC}} + \frac{s_{PC}}{\lambda_{PC}} + \frac{1}{\alpha_{PC,Kw}}} \quad \text{Gleichung 29}$$

Mit: $k_{L,Kw,PC}$ = Wärmedurchgangskoeffizient von der Luft zum Kühlwasser für den Absorber aus Polycarbonat [W/m^2K]

$\alpha_{L,Sole}$ = Wärmeübergangskoeffizient zwischen Luft und Sole [W/m^2K]

s_{Sole} = Schichtdicke der Sole [m]

λ_{Sole} = Wärmeleitfähigkeit der Sole [W/mK]

$\alpha_{Sole,PC}$ = Wärmeübergangskoeffizient Sole und Polycarbonat [W/m^2K]

s_{PC} = Schichtdicke der Doppelstegplatte aus Polycarbonat [m]

λ_{PC} = Wärmeleitfähigkeit der Doppelstegplatte aus Polycarbonat [W/mK]

$\alpha_{PC,Kw}$ = Wärmeübergangskoeffizient zwischen Doppelstegplatte und Kühlwasser für den Absorber aus Polycarbonat [W/m^2K]

Die beiden letzten Gleichungen können erheblich vereinfacht werden, da die in der Abbildung 48 gezeigten Materialstärken und die Dicke der Soleschicht zu gering sind, um einen erheblichen Einfluß auf den Wärmedurchgang aus zu üben. Die geringen Materialstärken lassen die Annahme zu, dass das Vlies, die Sole und die Doppelstegplatte die gleiche Temperatur aufweisen. Da die Gleichungen aufgrund der getroffenen Annahme nicht mehr von den unterschiedlichen Materialien abhängen, lassen sich diese auf eine gemeinsame Gleichung reduzieren:

$$k_{L,Kw} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{L,Sole}} + \frac{1}{\alpha_{PP,PC,Kw}}} \quad \text{Gleichung 30}$$

Mit: $k_{L,Kw}$ = Wärmedurchgangskoeffizient von der Luft zum Kühlwasser für beide Absorberoberflächen [W/m^2K]

$\alpha_{L,Sole}$ = Wärmeübergangskoeffizient zwischen Luft und Sole [W/m^2K]

$\alpha_{PP,PC,Kw}$ = Wärmeübergangskoeffizient zwischen Doppelstegplatte und Kühlwasser für beide untersuchten Absorber [W/m^2K].

Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{L, \text{Sole}}$ von der Luft zur abfließenden Sole kann durch die Lewissche Beziehung, eine Näherung, die den Wärme- mit dem Stoffübergangskoeffizienten in der Gasphase verknüpft, berechnet werden:

$$\alpha_{L, \text{Sole}} = \beta_{L, \text{Sole}} \times Le \times c_{p, \text{Sole}} \times \rho_L$$

Gleichung 31, [55]

Mit: $\alpha_{L, \text{Sole}}$ = Wärmeübergangskoeffizient von Luft zur Sole [W/m²K]

$\beta_{L, \text{Sole}}$ = Stoffübergangskoeffizient von der Luft zur Sole [m/s]

Le = Lewis Kennzahl, hier $Le = 0,75 \cdot 8$

$c_{p, \text{Sole}}$ = spezifische Wärmekapazität der Sole [J/kg K]

ρ_L = Dichte der Sole [kg/m³]

Die Lewis Kennzahl wird hier mit $Le = 0,75$ gewählt, da bei der Kombination von Wasser und Luft für $Le = 1$ und für die Kombination von Wasser und Sole $Le = 0,5$ gilt. Da der Wärme- und der Stoffübergangskoeffizient durch Gleichung 29 verknüpft sind, ist es nicht verwunderlich, daß auch die Darstellung des Wärmeübergangskoeffizienten zur Überströmgeschwindigkeit einen ähnlichen Verlauf hat wie in Abbildung 47 dargestellt.

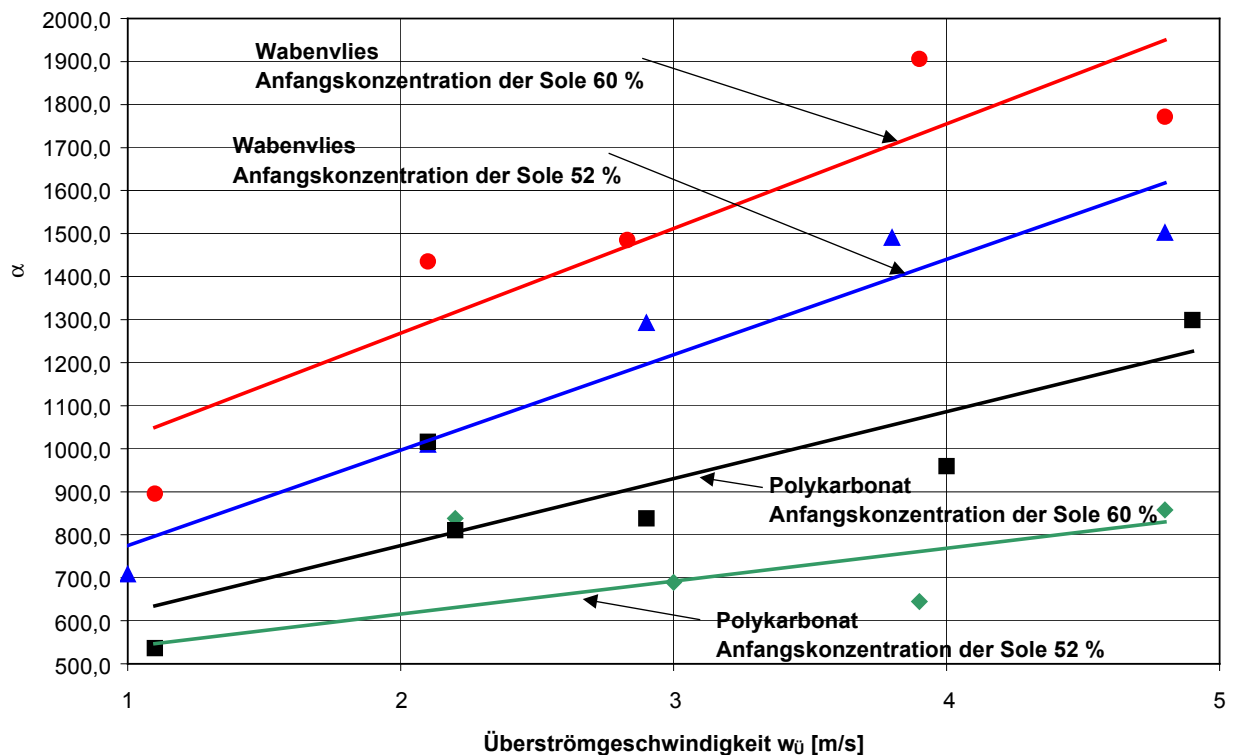


Abbildung 49: Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{L, \text{Sole}}$ [W/m²K] von der Luft zur Sole im Verhältnis zur Überströmgeschwindigkeit $w_{\text{Ü}}$ [m/s]

Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{L, \text{Sole}}$ steigt mit zunehmender Überströmgeschwindigkeit $w_{\text{Ü}}$ stetig an. Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{L, \text{Sole}}$ bewegt sich je nach Solekonzentration, Oberfläche des Absorbers in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit zwischen $500 \text{ W/m}^2\text{K} < \alpha_{L, \text{Sole}} < 1800 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{PP,PC}, \text{KW}}$ von der Doppelstegplatte zum Kühlwasser aus Gleichung 30 kann durch nachfolgende Gleichung 32 berechnet werden:

$$\alpha_{\text{PP,PC}, \text{KW}} = \frac{\dot{Q}_{\text{KW}}}{A \times \Delta\vartheta_{\text{KW}}}$$

Gleichung 32

Mit: $\alpha_{\text{PP,PC}, \text{KW}}$ = Wärmeübergangskoeffizient von der Doppelstegplatte zum Kühlwasser für beide untersuchte Absorber [W/m²K]

\dot{Q}_{KW} = Wärmestrom des Kühlwassers [W]

A = Fläche des Absorbers [m²]

$\Delta\vartheta_{\text{KW}}$ = Temperaturdifferenz des Kühlwassers [K]

$\Delta\vartheta_{\text{KW}}$

Der mit Hilfe der Gleichung 32 berechnete Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{PP,PC,KW}$ von der Doppelstegplatte zum Kühlwasser für beide Absorberoberflächen ist in der nachfolgenden Abbildung 50 zur Überströmgeschwindigkeit w_0 [m/s] im dargestellt.

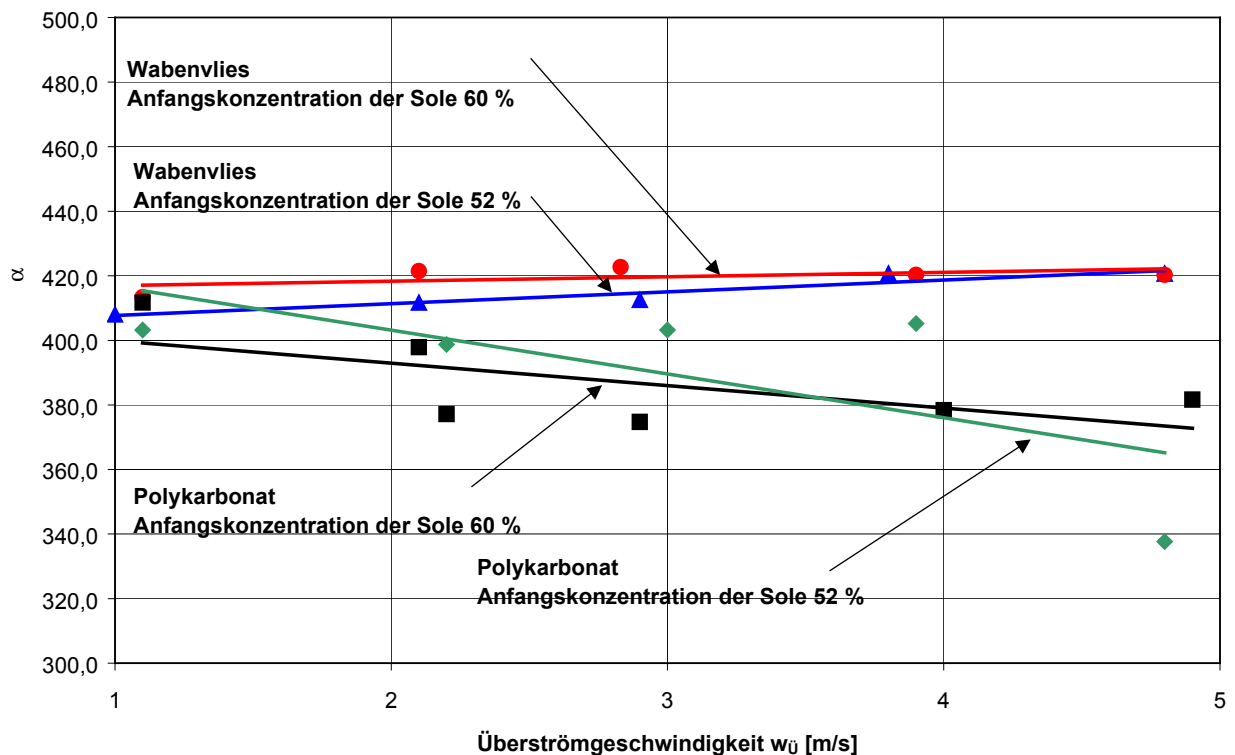


Abbildung 50: Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{PP,PC,KW}$ [W/m²K] von der Doppelstegplatte zum Kühlwasser im Verhältnis zur Überströmgeschwindigkeit w_0 [m/s].

Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{PP,PC,KW}$ in der Abbildung 50 ist unabhängig von der Anfangskonzentration der Sole. Lediglich die Beschaffenheit der Oberfläche des Absorbers wirkt sich auf den Wärmeübergang aus. Bei dem Absorber mit der Wabenvliesoberfläche (Doppelstegplatte aus Polypropylen) ist der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{PP, KW}$ unabhängig von der Überströmgeschwindigkeit. Die verbesserte Wärmeübertragung kann auf die schlechteren Benetzungseigenschaften des Wabenvlieses und die kleinen Vertiefungen in der Oberfläche (vgl.: Abbildung 19) zurückgeführt werden (vgl.: [53], [55]). Bei dem Absorber mit der wasserspreitenden Beschichtung (Doppelstegplatte aus Polykarbonat) nimmt der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{PC, KW}$ mit steigender Überströmgeschwindigkeit ab. Bei der Wabenvliesoberfläche liegt die Trendlinie der Messwerte des Wärmeübergangskoeffizienten im Verhältnis zur ansteigenden Überströmgeschwindigkeit bei Werten um $\alpha_{PP, KW} = 410$ W/m²K. Bei dem Absorber aus Polykarbonat nimmt der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{PC, KW}$ mit steigender

Überströmgeschwindigkeit von $\alpha_{PP, KW} = 410 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf $\alpha_{PP, KW} = 370 \text{ W/m}^2\text{K}$ ab.

Im nachfolgenden Kapitel wird das Verhältnis der sensiblen zur umgewandelten latenten Wärme dargestellt.

11.5.3 Aufteilung der sensiblen zur umgewandelten latenten Wärme

Die komplexen Wärmeübergänge sind anschaulich im nachfolgenden Wärmeflußdiagramm Abbildung 51 nachzuvollziehen. Ein Teil der Enthalpie der Luft wird an die Sole und an das Kühlwasser übertragen.

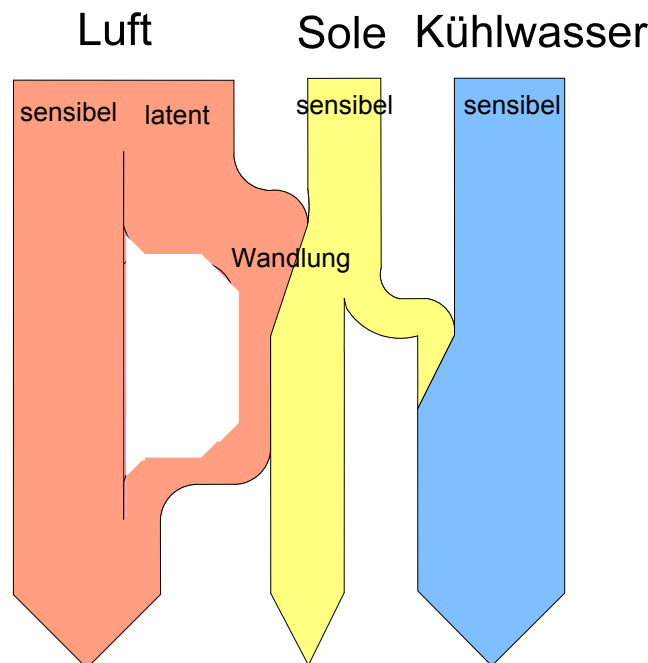


Abbildung 51: Schematische Darstellung der Wärmeströme im Absorber

Die Darstellung der Wärmeströme in der Abbildung 51 geht von einer vollständigen Benetzung der Absorberplatte aus. In Realität wird ein Teil der sensiblen Wärme der Luft an den unbenetzten Stellen der Absorberoberfläche direkt an das Kühlwasser übertragen. Die Enthalpie der Luft, die im Absorber abgegeben wird, setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

- den sensible Anteil, der durch die Temperaturdifferenz der Luft hervorgerufen wird
- und den latenten Anteil, der durch die Kondensation des Wasserdampfes in die wässrige Salzlösung frei wird.

Die Salzlösung wird einerseits durch den sensible Anteil der Enthalpie der Luft, andererseits durch die umgewandelte latente Wärme erwärmt, hervorgerufen durch den Aggregatswechsel des in der Luft enthaltenen Wassers. Einen Teil der von der latenten zur sensiblen umgewandelten Wärme nimmt das Kühlwasser auf, ein weiterer Teil der Wärme verbleibt in der Sole. Ein dritter Teil des gewandelten latenten Wärmestroms wird an die Luft zurück übertragen und mitgeführt.

Die Versuche wurden einmal mit der Entfeuchtung der Luft durch die wässrige Salzlösung durchgeführt und einmal ohne das dem Absorber Sole zugeführt wird, sodass sich aus der Differenz der Wärmeströme, die übertragen werden, der sensible sowie der latente Anteil laut der nachfolgenden Gleichung 33 verifizieren lässt.

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_L \times \left(\underbrace{c_{pL} \times \Delta\vartheta}_{\text{sensibel}} + \underbrace{c_{pW} \times \Delta x \times \Delta\vartheta + r_0 \times \Delta x}_{\text{latent}} \right) \quad \text{Gleichung 33:}$$

Mit: \dot{Q}_L = Wärmestrom der Luft [W]

\dot{m}_L = Massenstrom der Luft [kg/s]

c_{pL} = spezifische Wärmekapazität der Luft [J/kg K]

c_{pW} = spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfs [J/kg K]

$\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz der Luft: Eintritt-Austritt [K]

Δx = Differenz der absoluten Feuchte Luft: Eintritt-Austritt [kg_W/kg_{tr L}]

r_0 = spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers bei 0°C [J/kg]

Im der nachfolgenden Abbildung 52 ist die Aufteilung des latenten zum sensiblen Wärmestrom aufgetragen, jeweils für die Überströmgeschwindigkeiten, Absorberoberflächen und Solekonzentrationen.

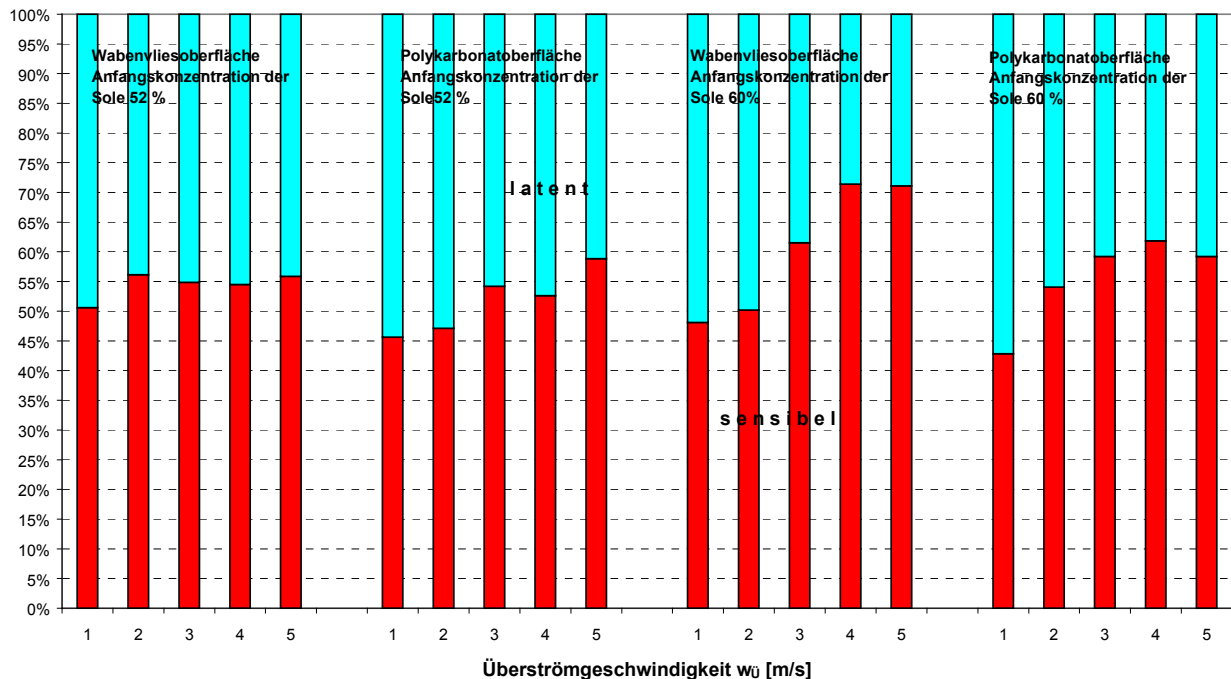


Abbildung 52: Aufteilung des latenten zum sensiblen Wärmestrom in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit, der Absorberoberfläche und der Solekonzentration

Das Verhältnis zwischen latentem und sensiblem Wärmestrom liegt bei den Versuchen mit einer Konzentration von 52 % bei ungefähr 50 %. Bei den Versuchen, die mit einer Solekonzentration von 60 % durchgeführt wurden, steigt der sensible Anteil in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit auf bis zu 70 % an.

Die Enthalpie der Luft wird zu einem Teil von der Sole und zum anderen Teil von dem Kühlwasser aufgenommen. Der Anteil des Wärmestroms, den das Kühlwasser aufnimmt, kann über dessen Temperaturdifferenz berechnet werden. Aus der Differenz zum Wärmestrom der Luft ergibt sich daher der Anteil des Wärmestroms, den die Sole aufnimmt.

In dem nächsten Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse beschrieben, die in die Fertigung eines mehrschichtigen Absorbers mit einfließen.

12 Folgerungen für die Konstruktion

Aus den Ergebnissen der vorhergehenden Messungen lassen sich Kriterien ableiten, die als konstruktive Vorschläge in die Fertigung eines mehrschichtigen Absorbers mit einfließen könnten. Nachfolgend werden diese konstruktiven Ideen kurz beschrieben:

- Um einen vollständigen Benetzungsgrad zu erreichen, muss die Sole auf dem Absorber zum Beginn der Entfeuchtung einmalig verwischt werden. Der vollständige Benetzungsgrad bleibt dann (vgl.: Kapitel 8.2) bestehen. Praktisch kann dies z. B. durch folgende Möglichkeiten realisiert werden: Erstens durch kurzzeitiges Fluten des Absorbers zum Beginn der Entfeuchtung; zweitens durch Unterschreitung der Taupunkttemperatur der Oberfläche des Absorbers durch das Kühlwasser oder drittens durch einen Wischer.
- Es ist möglich, die beschriebene wasserspreitende Schicht auf beiden Seiten der Doppelstegplatte aufzubringen, um die entfeuchtende Fläche bei gleichem Platzbedarf zu verdoppeln. In der nachfolgenden Abbildung 53 (vgl.: Abbildung 27, Abbildung 29) ist ein Detail eines Absorbers zu sehen, der auf beiden Absorberplattenseiten von der Sole benetzt wird. Dies wird erreicht, indem die Plexiglasschiene als Abstandhalter zwischen den absorbierenden Platten fungiert und in der Plexiglasschiene beidseitig die bisektionale Verteilung eingefräst ist. Die mit der wasserspreitenden Schicht versehenen Absorberplatten werden durch die Doppelstegplatten ausgebildet, die mit Kühlwasser durchflossen werden.
- Die Verteilung der Konzentration entlang des Strömungsweges der Luft ergibt, dass die im Versuchsaufbau verwendete Plattenbreite auf $1/3$ gekürzt werden könnte, um nahezu die gleiche Abnahme der Konzentration und damit verbunden, die gleiche Entfeuchtungsleistung zu erhalten. In diesem Versuchsaufbau würde das bedeuten, dass ein Absorber mit einer Plattenbreite von 20 cm ähnliche Entfeuchtungsergebnisse geliefert hätte. In den ersten 20 cm entlang des Strömungsweges wurden der Luft bereits $\sim 75\%$ -auf den weiteren 40 cm der Absorberplatte- nur noch 25 % der von der Salzlösung aufgenommenen Wassermenge entzogen.

- Aus der geringen durchschnittlichen Konzentrationsabnahme der Sole von 1,8 % lässt sich ein Kreislaufbetrieb der Sole ausschließen. Die Sole ist durch die aufgenommenen Feuchtigkeit bereits so verdünnt, dass sie der Regeneration zugeführt werden muss, um das treibende Entfeuchtungspotential der hohen Konzentration aufrecht zu halten.
- Der Grund der geringere Entfeuchtung durch die beschichtete Polykarbonatplatte ist vermutlich in der schnelleren Ablaufgeschwindigkeit der Sole zu finden. Konstruktiv könnte die Ablaufgeschwindigkeit durch eine wellenförmige Ausbildung der Absorberfläche parallel zur Strömungsrichtung gesenkt und der Grad der Entfeuchtung voraussichtlich entscheidend verbessert werden.

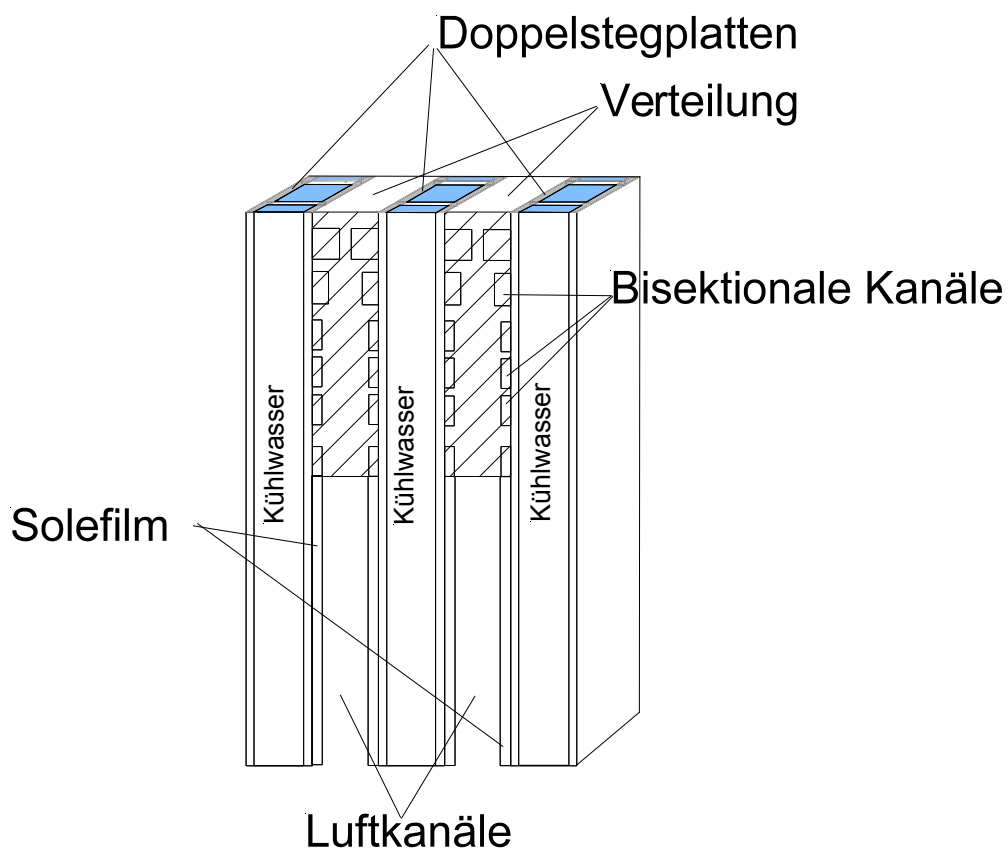


Abbildung 53: Schnittdarstellung im Bereich der Verteilung eines mehrschichtigen Absorbers, dessen Absorberplatten beidseitig mit Sole benetzt werden (vgl.: auch Abbildung 27 und Abbildung 29)

13 Zusammenfassung

An einem neuartigen Entfeuchter werden umfangreiche Temperatur- und Konzentrationsmessungen durchgeführt. Der Entfeuchter entzieht das in der Luft enthaltene Wasser durch den hygroskopischen Effekt einer wässrigen Salzlösung, die im Kreuzstrom über die entfeuchtende Platte geführt wird. Um die Oberfläche der wässrigen Salzlösung und damit die an der Absorption beteiligte Austauschfläche so groß wie möglich zu gestalten, muss die Lösung auf der Absorberoberfläche gleichmäßig verteilt werden. Hierfür wurde eine bisektionale Verteilung weiterentwickelt. Die Aufteilung des Stoffstromes in sich verzweigende Kanäle gleicher Länge und gleicher Querschnittsfläche stellt die gleichmäßige Verteilung der verwendeten wässrigen Salzlösung unabhängig von der Durchflussmenge sicher. Diese Verteilung eignet sich durch ihre Kompaktheit für den Betrieb in einem mehrschichtigen Plattenabsorber und durch deren einfachen Aufbau für die Serienherstellung.

Zwei Absorber, die in ihren Abmaßen gleich sind, werden mit unterschiedlichen Oberflächen ausgestattet, um ihre Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit zu testen. Der Absorber I ist mit einem Vlies mit einer wabenartigen Struktur versehen. Der Absorber II besteht aus einer reinen Polykarbonatplatte, die auf der einen Seite mit einer wasserspreitenden Schicht überzogen ist. Als wasserspreitende Schicht eignen sich neben den reinen Oxiden auch Oxid-Gemische. Um einen vollständigen Benetzungsgrad zu erreichen, muss die Sole auf dem Absorber zum Beginn der Entfeuchtung einmalig verwischt werden, der vollständige Benetzungsgrad bleibt dann erhalten. Die einmalig vollständig benetzte Oberfläche der wasserspreitenden Schicht garantiert einen maximal zu erreichenden Benetzungsgrad und ist konstruktiv in der Praxis unbedingt zu realisieren.

Die beiden Oberflächen der Absorber werden hinsichtlich ihrer Entfeuchtungseigenschaften mit unterschiedlicher Startkonzentration der Sole untersucht. Die erste Versuchsreihe startet mit einer Konzentration von 60 %, die zweite mit einer Konzentration der Sole von 52 %. Zusätzlich zur Veränderung der Konzentration der Sole wurde die Überströmgeschwindigkeit der Luft über die benetzte Absorberfläche als Variable gewählt. Als Überströmgeschwindigkeiten der Luft über den Absorber wurden 1-5 m/s im Abstand von 1 m/s gewählt.

Die Konzentration der Sole ist der wichtigste zu überwachende Parameter in einer mit

wässrigen Salzlösung betriebenen Entfeuchtungsanlage. Aus diesem Grund wurde die Leitfähigkeit der wässrigen Salzlösung gemessen, anhand derer auf die Salinität zurück geschlossen werden kann.

Die Solekonzentration ist bei einem anfänglichen Salzgehalt von 52 % bei der Absorberoberfläche aus Polykarbonat geringfügig höher. Die durchschnittliche Abnahme der jeweiligen Konzentration ist mit 0,5 % bis 1,8 % sehr gering. Die geringe durchschnittliche Konzentrationsabnahme der Sole von 1,8 % schließt einen Kreislaufbetrieb der Sole aus. Konstruktiv scheint es ausreichend zu sein, die absorptive Plattenlänge in diesem Versuchsaufbau auf ~ 17-20 cm zu verkürzen, um bezüglich der Konzentrationsabnahme gleiche Werte zu erhalten.

Bei gleicher Startkonzentration und gleicher Überströmgeschwindigkeit erscheinen bei der Wabenvliesoberfläche Bereiche, die eine höhere Temperatur aufweisen. Dies ist durch die vermutete größere Verweildauer der Sole auf der Wabenvliesoberfläche zu erklären. Durch die längere Reaktionszeit zwischen Sole und Wasserdampf fällt die freiwerdende latente Wärme stärker ins Gewicht und trägt so zusätzlich zur Erwärmung bei.

In einer raumluftechnischen Anlage ist es notwendig, die Druckverluste der einzelnen Systembausteine kleinstmöglich zu halten. Aus diesem Grund wurden bereits bei den vermessenen Prototypen die Druckverluste bei den unterschiedlichen Oberflächen und Überströmgeschwindigkeiten über den Absorber gemessen. Im Vergleich zu Gegenströmern und Sorptionsrädern, sind die auftretenden Druckverluste bei Kreuzstromfahrweise in ähnlicher Größenordnung zu finden. Wird die typische Durchströmungsgeschwindigkeit von RLT-Zentralgeräten von 2,5 m/s zugrunde gelegt, so liegen die Druckverluste bei dem untersuchten Absorber mit der Polykarbonatoberfläche bei 80 Pa, bei dem von Röben untersuchten Gegenströmer bei 90 Pa und bei einem gewählten Sorptionsrad der Fa. Klingenburg bei 100 Pa. Für größere Luftvolumenströme können in der Kreuzstromfahrweise mehrere entfeuchtende Platten parallel geschaltet werden, sodass bei gleichbleibender Überströmgeschwindigkeit sich die Druckverluste nicht ändern.

Im Vergleich der beiden untersuchten Oberflächen fällt auf, dass bei steigender Überströmgeschwindigkeit die Entfeuchtungsbreite der Absorber sinkt. Die gemessene Entfeuchtungsbreite ist bei den Konzentrationen von 52 % und 60 % größer als bei dem Absorber, der mit der Polykarbonatoberfläche betrieben wird.

Die Entfeuchtungsleistung der Wabenvliesoberfläche ist bei der typischen

Durchströmungsgeschwindigkeit von Klimazentralgeräten von 2,5 m/s um 6 % größer als bei der Polykarbonatoberfläche. In absoluten Werten bedeutet dies, dass der Luft bei einer Startkonzentration der Sole von 60 % und einer Überströmgeschwindigkeit von 2,5 m/s der Luft, durch die Wabenvliesoberfläche $\Delta x = 3,2 \text{ g}_W/\text{kg}_{\text{tr. L}}$ und mit der Polykarbonatoberfläche $\Delta x = 3,0 \text{ g}_W/\text{kg}_{\text{tr. L}}$ Wasser entzogen werden kann.

Der Entfeuchtungsgrad nimmt mit zunehmendem Π -Verhältnis ab. Eine lineare Abnahme der Entfeuchtungsbreite von 5 % je zunehmender Überströmgeschwindigkeit pro m/s ist zu verzeichnen. Bei der Solekonzentration von 60 % und einem Π -Verhältnis entsprechend der typischen Überströmgeschwindigkeit ist der Entfeuchtungsgrad der Wabenvliesoberfläche um 22 % besser als der Entfeuchtungsgrad der Polykarbonatoberfläche. Im Mittel liegen bei beiden Oberflächen und Konzentrationen die Entfeuchtungsgrade um ca. 30 %. Bei sehr kleinem Π -Verhältnis von 2 und Überströmgeschwindigkeiten um 1 m/s liegt der maximal erreichte Entfeuchtungsgrad bei 45 %. Die erreichten Entfeuchtungsgrade unterhalb von 50 % zeigen, dass hinsichtlich der maximal möglichen Entfeuchtung bei einem Kreuzströmer weitere Entwicklungsarbeit notwendig ist.

Der Stoffübergangskoeffizient $\beta_{L, \text{Sole}}$ steigt mit zunehmender Überströmgeschwindigkeit $w_{\text{Ü}}$ für die jeweiligen Oberflächen und Anfangskonzentrationen stetig an. Der Stoffübergangskoeffizient ist bei der Wabenvliesoberfläche und einer Anfangskonzentration der Sole von 60 % am größten. Bemerkenswert ist, dass der Stoffübergangskoeffizient bei der Wabenvliesoberfläche und einer Startkonzentration der Sole von 52 % größer ist, als bei der Polykarbonatoberfläche und einer Startkonzentration der Sole von 60 %. Aus dieser Aussage folgt, daß neben der Anfangskonzentration der Sole auch die Wahl der Absorberfläche für den Stoffübergangskoeffizienten und demzufolge den Entfeuchtungsgrad von Bedeutung ist. Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{L, \text{Sole}}$ steigt mit zunehmender Überströmgeschwindigkeit $w_{\text{Ü}}$ stetig an. Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{L, \text{Sole}}$ bewegt sich je nach Solekonzentration, Oberfläche des Absorbers in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit zwischen $500 \text{ W/m}^2\text{K} < \alpha_{L, \text{Sole}} < 1800 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{PP, PC, KW}}$ ist unabhängig von der Anfangskonzentration der Sole. Lediglich die Beschaffenheit der Oberfläche des Absorbers wirkt sich auf den Wärmeübergang aus.

Bei dem Absorber mit der Wabenvliesoberfläche (Doppelstegplatte aus Polypropylen) ist der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{PP, KW}}$ unabhängig von der

110

Überströmgeschwindigkeit. Bei dem Absorber mit der wasserspreitenden Beschichtung (Doppelstegplatte aus Polycarbonat) nimmt der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{PC, KW}$ mit steigender Überströmgeschwindigkeit ab. Bei der Wabenvliesoberfläche liegt die Trendlinie der Messwerte des Wärmeübergangskoeffizienten im Verhältnis zur ansteigenden Überströmgeschwindigkeit bei Werten um $\alpha_{PP, KW} = 410 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei dem Absorber aus Polycarbonat nimmt der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{PC, KW}$ mit steigender Überströmgeschwindigkeit von $\alpha_{PP, KW} = 410 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf $\alpha_{PP, KW} = 370 \text{ W/m}^2\text{K}$ ab.

Die Salzlösung wird im Absorber einerseits durch den sensiblen Wärmeinhalt der Enthalpie der Luft, andererseits durch den latenten Wärmeinhalt erwärmt, hervorgerufen durch den Aggregatswechsel des in der Luft enthaltenen Wassers. Einen Teil der von latent zu sensible umgewandelten Wärme nimmt das Kühlwasser auf, ein weiterer Teil der Wärme verbleibt in der Sole. Ein dritter Teil des gewandelten latenten Wärmestroms wird an die Luft zurück übertragen und mitgeführt. Das Verhältnis zwischen latenter und sensibler Erwärmung des Luftstromes liegt bei den Versuchen mit einer Startkonzentration von 52 % bei ungefähr 50 %. Bei den Versuchen, die mit einer Startkonzentration von 60 % durchgeführt wurden, steigt der sensible Anteil in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit auf bis zu 70 % an.

Es konnte in dieser Arbeit neben konstruktiven Verbesserungen gezeigt werden, dass der mit wässriger Salzlösung betriebene Entfeuchter in Kreuzstromfahrweise für die Klimatechnik ausreichende Entfeuchtungseigenschaften aufweist.

14 Ausblick

In diesem Kapitel wird ein kurzer Ausblick auf ausstehende Untersuchungen gegeben, die Motivation und Anregung für eine weiterführende Arbeit sein könnten:

- Die Ablaufgeschwindigkeit der Sole auf der Absorberplatte, die Auskunft über die Verweilzeit des Sorbens mit der zu entfeuchtenden Luft gibt, sollte hinsichtlich der möglichen Steigerung der Entfeuchtungsbreite analysiert werden.
- Bezüglich der Ermittlung der örtlichen Stoff- und Wärmeübergangskoeffizienten könnte die im Artikel „Sichtbarmachung und Bestimmung der örtlichen Stoff- und Wärmeübertragung an festen Wänden in Flüssigkeitsströmungen“ von Kühnel und Kottke beschriebenen Meßprinzipien aufschlußreiche Ergebnisse liefern [54].
- Die Lebensdauer der wasserspreitenden Beschichtung müßte über den Messzeitraum von 5 Monaten hinaus verifiziert werden. Es muss sichergestellt werden, dass durch den direkten Kontakt der Sole mit der Luft ein eventuelles Mitführen von Aerosolen in den Zuluftstrom ausgeschlossen ist.

15 Epilog

„Ich kenne niemanden, der Energie sparen will,
ich kenne nur Leute, die Geld sparen wollen !“

Prof. Dr.-Ing. Fritz Steimle, Universität Essen

16 Anhang

16.1 Technische Zeichnungen

16.1.1 Verteilung

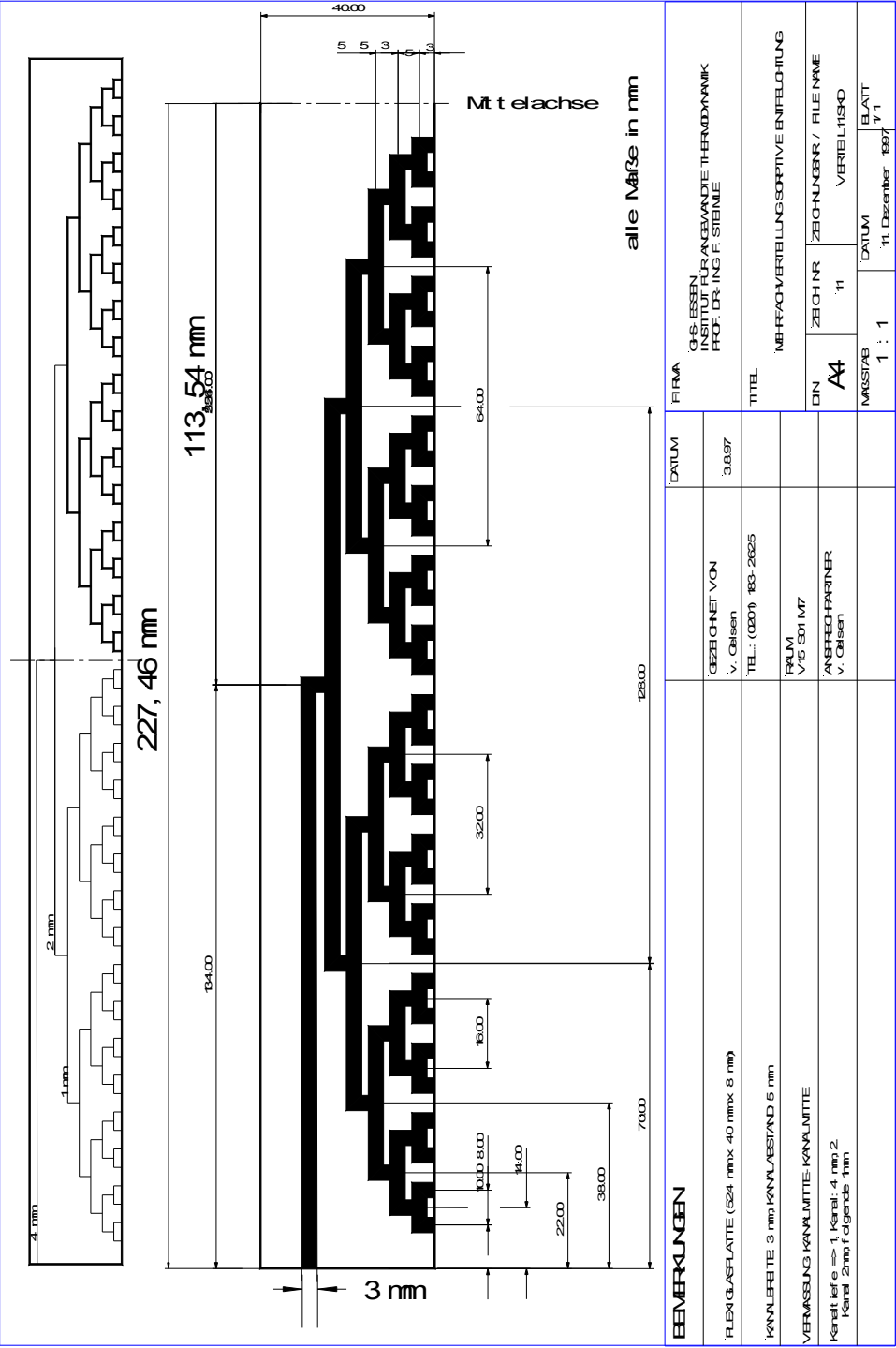


Abbildung 54: Detailzeichnung der bisektionalen Verteilung

16.1.2 Absorber

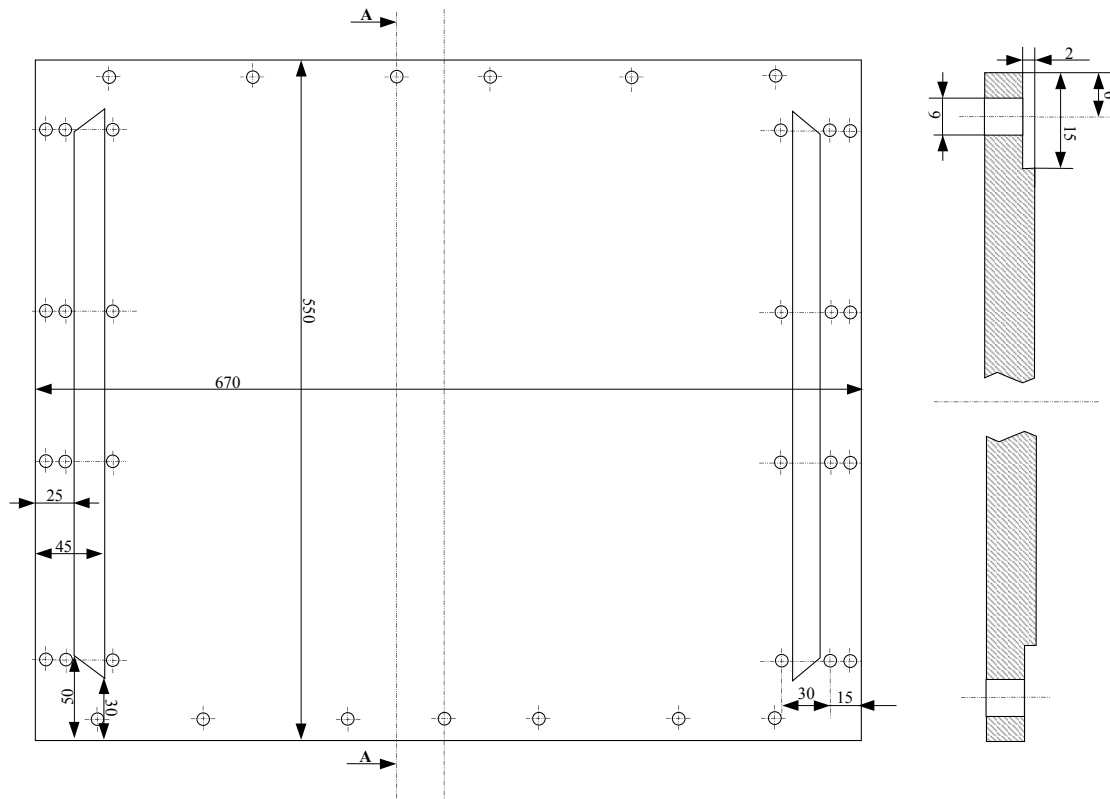


Abbildung 55: Abdeckplatte aus transparentem Plexiglas [46]

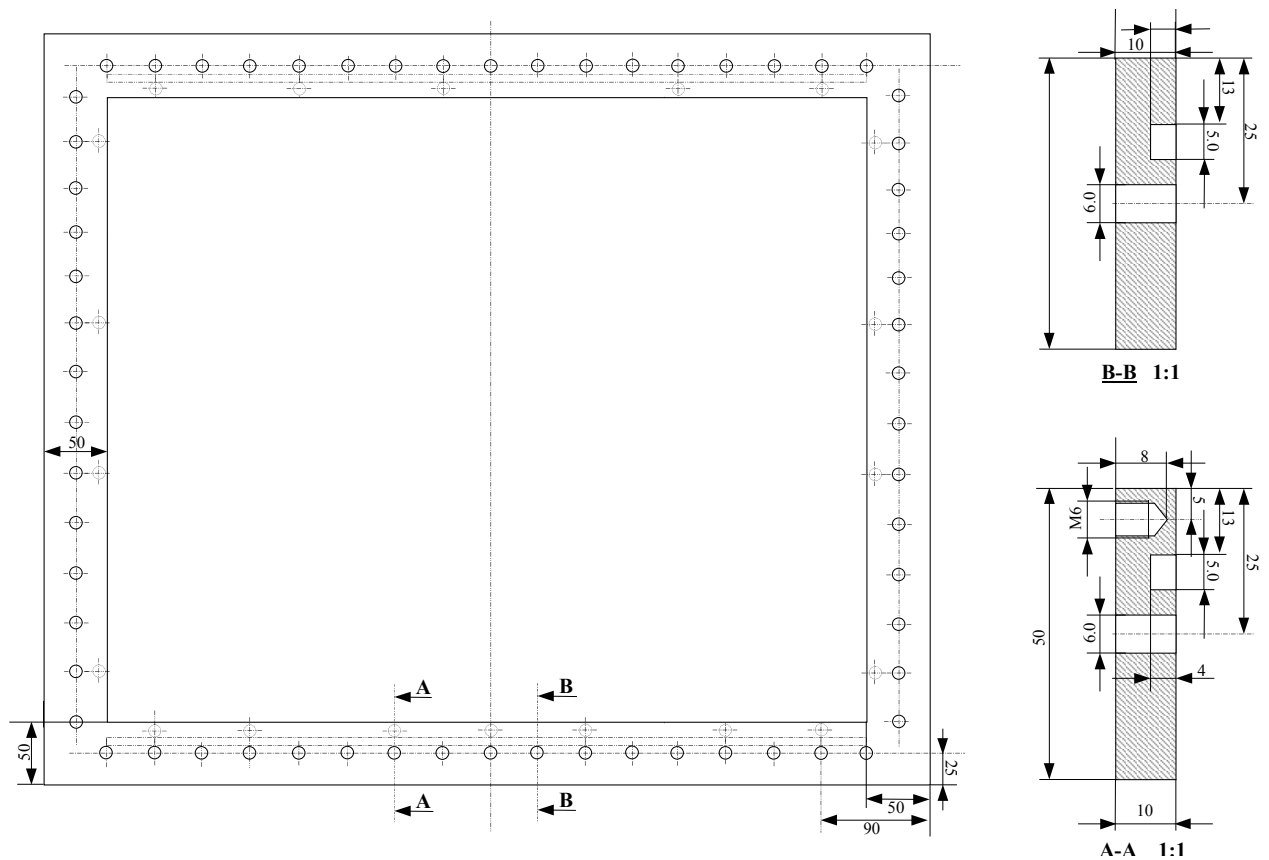


Abbildung 56: Vorderteil der Rahmens aus Trovidur (PVC) [46]

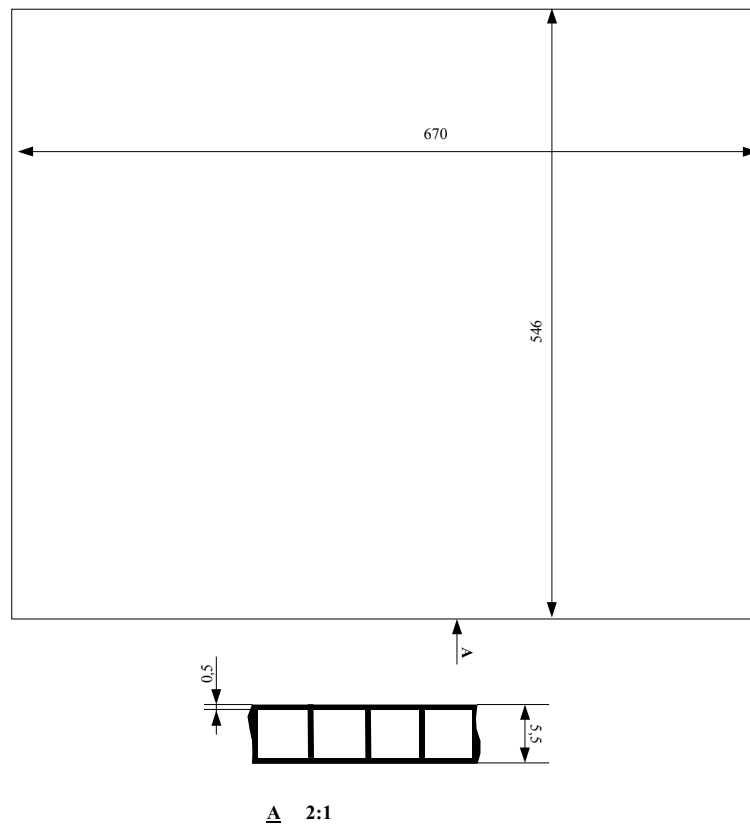


Abbildung 57: Doppelstegplatte aus Polypropylen, Oberfläche: Wabenvlies [46]

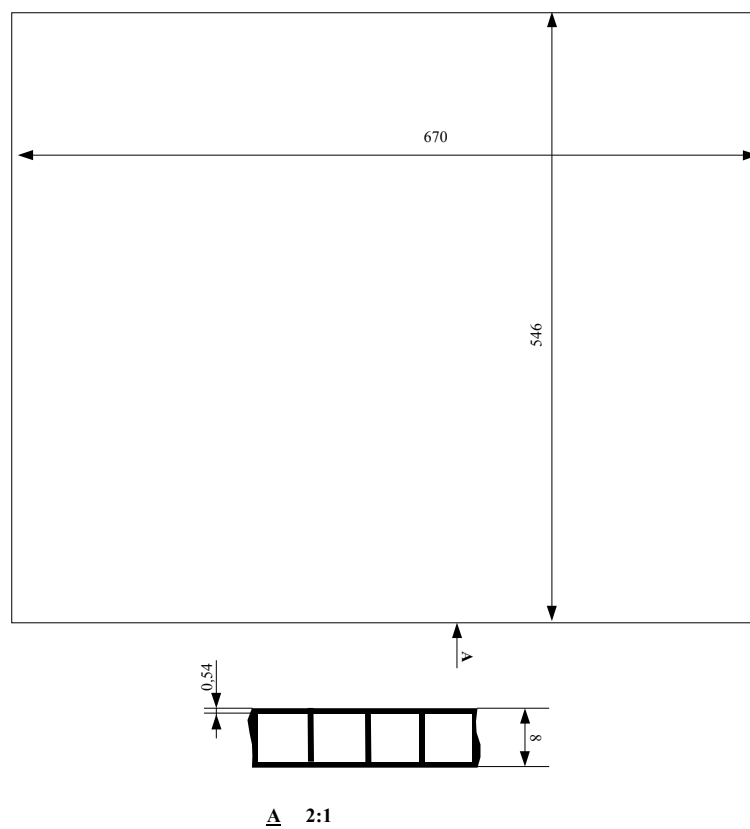


Abbildung 58: Doppelstegplatte aus Polycarbonat, Oberfläche: NO DROP wasserspreitend [46]

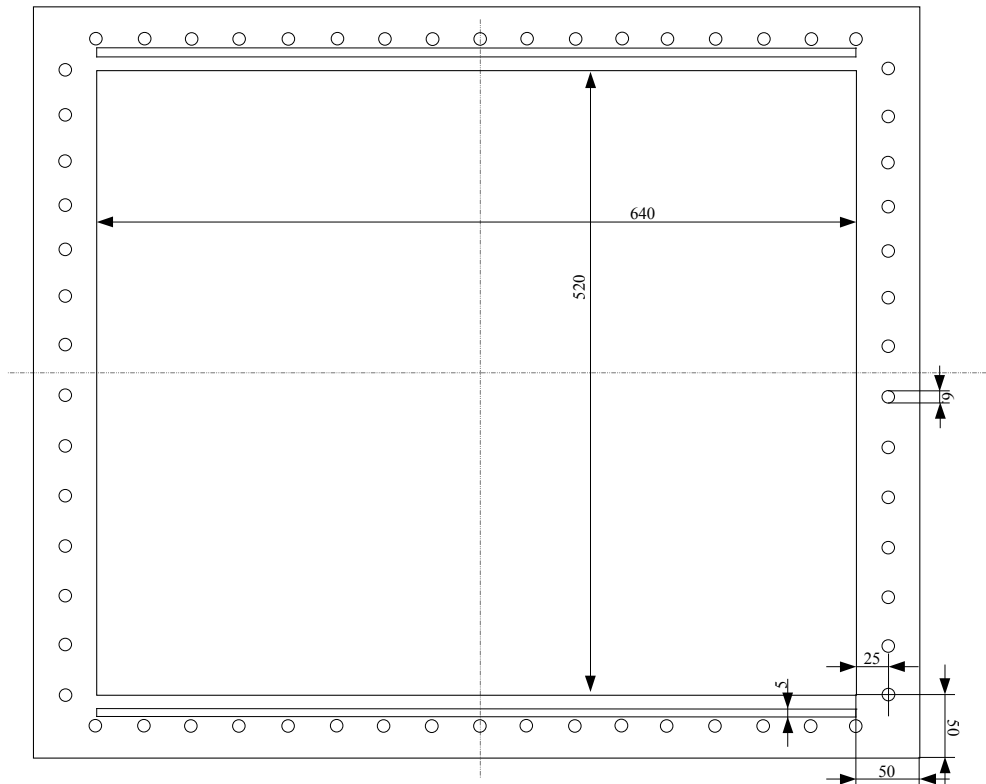


Abbildung 59: Dichtung zwischen den Rahmen und der Doppelstegplatte [46]

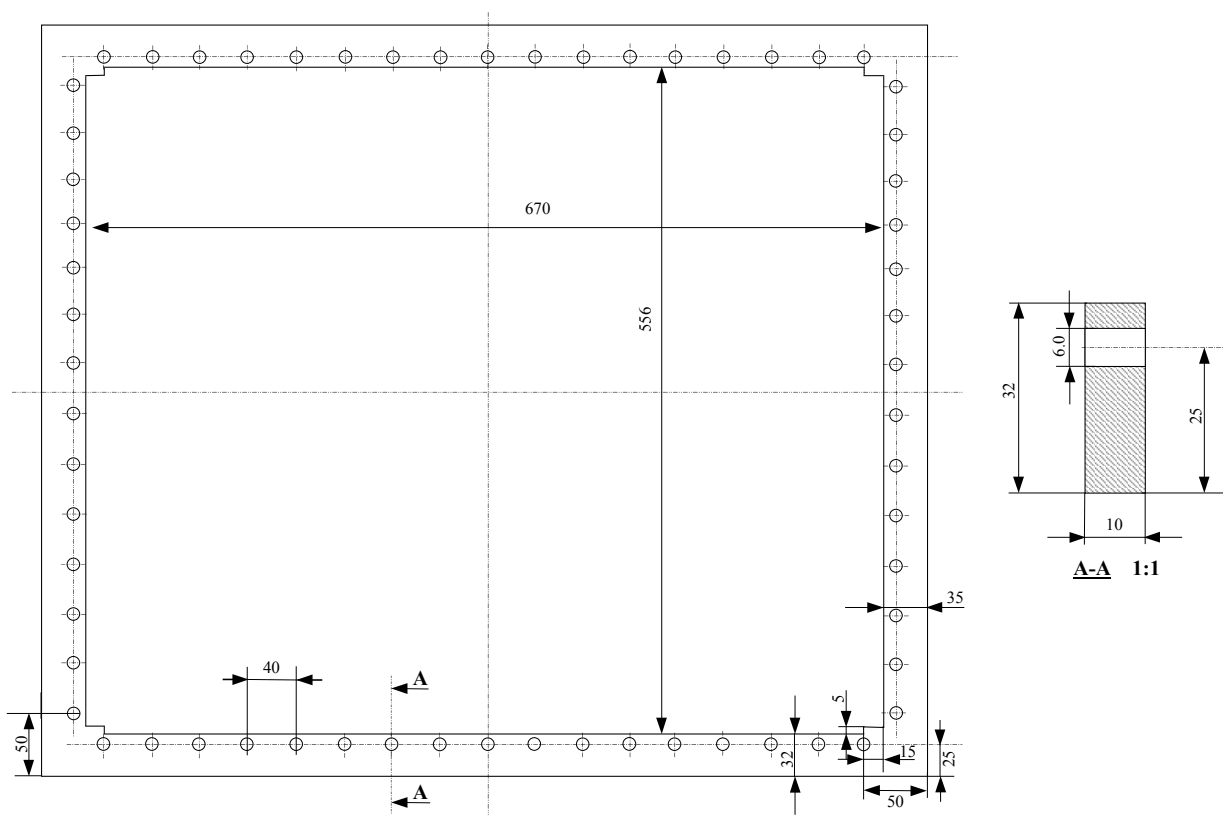
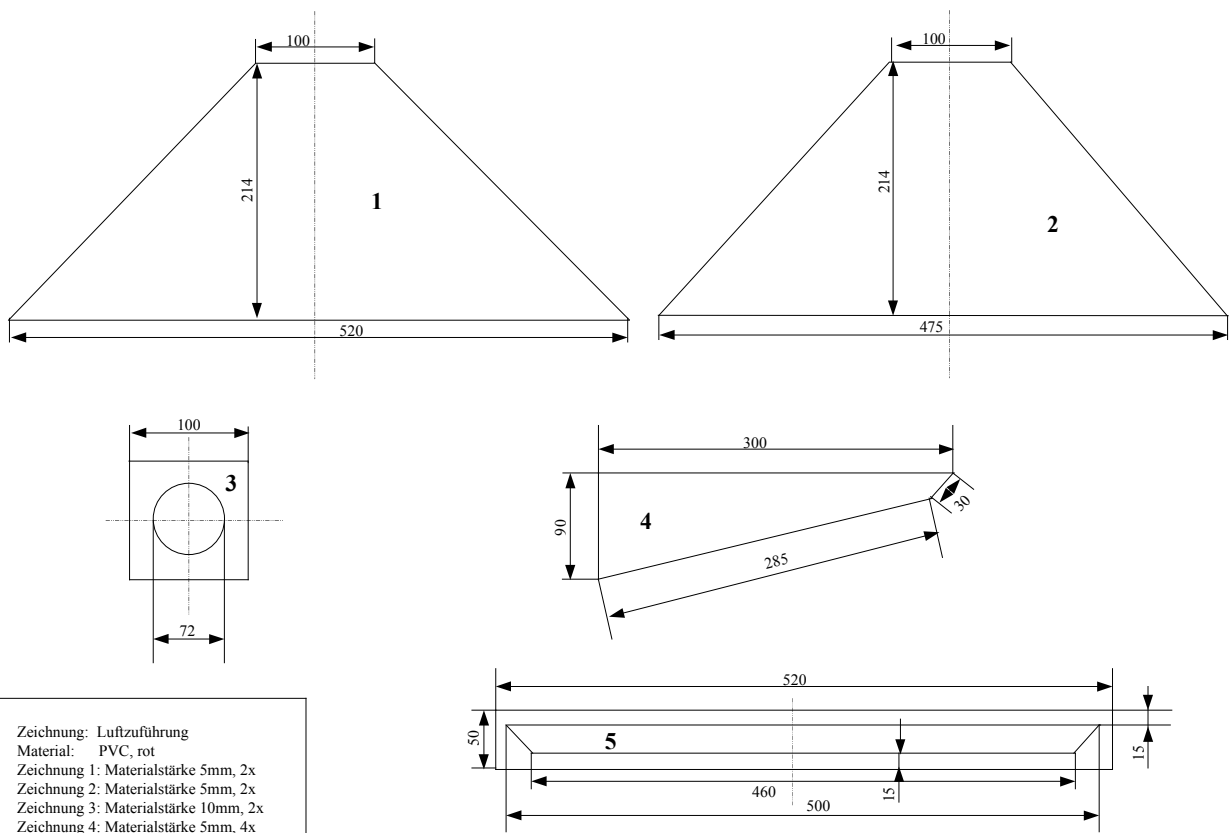
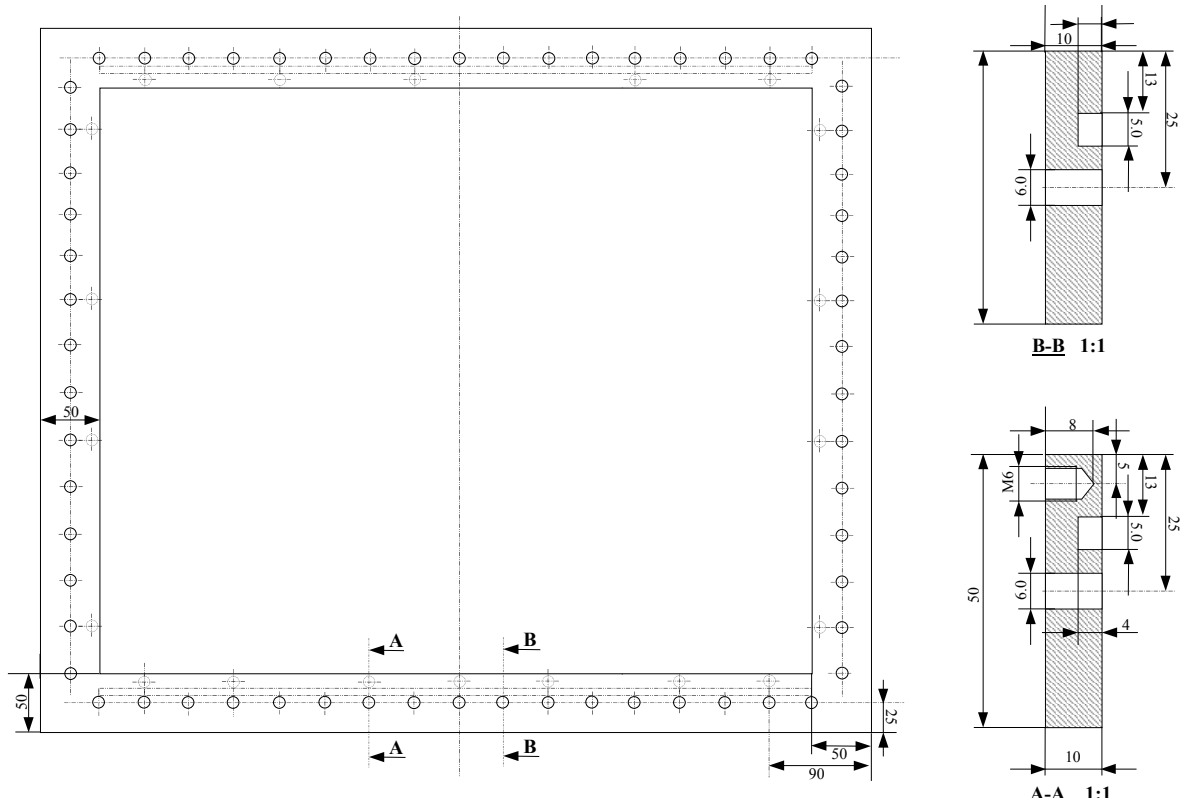
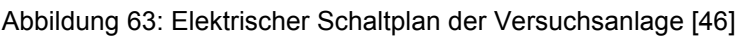


Abbildung 60: Mittelteil des Rahmens aus Trovidur (PVC) [46]





16.2 Berechnungen

16.2.1 Berechnungen der Konstanten des Biegeschwingers

Die Berechnung der Konstanten des Biegeschwingers aus Kapitel: 8.3.1 beruht auf der Schwingungsdauer der Gleichung 14

$$T^2 = \frac{4 \times M}{\underbrace{C}_B} + \frac{4 \times V}{\underbrace{C}_A}$$

Gleichung 14

Mit T = Schwingungsdauer der Probe [s]

M = Leermasse des Schwingers [kg]

ρV = Masse des Meßgutes [kg/m³]

Die Werte für die Dichte von feuchter Luft und destilliertem Wasser sind dem VDI-Wärmeatlas [55] entnommen:

Feuchte Luft: $\rho_{L, 30^\circ\text{C}} = 1,149 \text{ kg/m}^3$

Destilliertes Wasser: $\rho_{W, 30^\circ\text{C}} = 995,7 \text{ kg/m}^3$

gemessen wurden die Werte für die Schwingdauer T mit dem Biegeschwinger:

Feuchte Luft: $T_{L, 30^\circ\text{C}} = 4,8592 \text{ s}$

Destilliertes Wasser: $T_{W, 30^\circ\text{C}} = 6,5789 \text{ s}$

Diese Werte werden in die Gleichung eingesetzt und nach den Konstanten A und B eliminiert:

$$T^2 = (A\rho) + B$$

$$A = \frac{T_{L, 30^\circ\text{C}}^2 - B}{\rho_{L, 30^\circ\text{C}}}$$

$$B = T_{W, 30^\circ\text{C}}^2 - (A\rho_{W, 30^\circ\text{C}})$$

$$A = \frac{T_{L, 30^\circ\text{C}}^2 - [T_{W, 30^\circ\text{C}}^2 - (A\rho_{W, 30^\circ\text{C}})]}{\rho_{L, 30^\circ\text{C}}}$$

$$A\rho_{L, 30^\circ\text{C}} = T_{L, 30^\circ\text{C}}^2 - T_{W, 30^\circ\text{C}}^2 + A\rho_{W, 30^\circ\text{C}}$$

$$A\rho_{L, 30^\circ\text{C}} - A\rho_{W, 30^\circ\text{C}} = T_{L, 30^\circ\text{C}}^2 - T_{W, 30^\circ\text{C}}^2$$

$$A(\rho_{L, 30^\circ\text{C}} - \rho_{W, 30^\circ\text{C}}) = T_{L, 30^\circ\text{C}}^2 - T_{W, 30^\circ\text{C}}^2$$

$$A = \frac{T_{L, 30^\circ\text{C}}^2 - T_{W, 30^\circ\text{C}}^2}{\rho_{L, 30^\circ\text{C}} - \rho_{W, 30^\circ\text{C}}}$$

Mit den Zahlenwerten für die Schwingdauer von Luft und destilliertem Wasser können nun die Konstanten A und B berechnet werden

$$A = \frac{4,8592^2 \text{ s}^2 - 6,5789^2 \text{ s}^2}{1,149 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 995,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$A = 0,01977787018464 \frac{\text{m}^3 \text{ s}^2}{\text{kg}}$$

$$B = 6,5789^2 \text{ s}^2 - \left(0,01977787018464 \frac{\text{m}^3 \text{ s}^2}{\text{kg}} \times 995,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$B = 23,58909986715 \text{ s}^2$$

16.2.2 Dichte

Mit der nachfolgenden Gleichung von Rößen [8] lässt sich die Dichte von Klimat 3990 S in einem Temperaturbereich von 10°C bis 50°C und einem Konzentrationsbereich von 0% bis 62% bestimmen:

$$(y,t) = c_1 + c_2 \times y + (c_3 + c_4 \times y) \times t + (c_5 + c_6 \times y) \times t^2$$

Gleichung 34

Mit: ρ = Dichte [kg/m³]
 y = Konzentration [1/100]
 t = Temperatur [°C]
 c_j = Berechnungskonstanten [-]

Die Zahlenwerte der Konstanten können nachfolgenden Tabellen für den jeweiligen Konzentrationsbereich entnommen werden:

c_1	993,601758337	c_2	9,182506083	C_3	-0,020372421
c_4	-	c_5	-0,004726655	C_6	0,000156629
	0,017742419				

Tabelle 14: Konstanten zur Berechnung der Dichte von Klimat 3990 S für den Konzentrationsbereich
 $0\% \leq y < 35\%$ [8]

c ₁	910,440776634	c ₂	11,718085636	C ₃	-0,392723556
C ₄	--	c ₅	-0,000480476	C ₆	0,000051896
	0,009253652				

Tabelle 15: Konstanten zur Berechnung der Dichte von Klimat 3990 S für den Konzentrationsbereich von $35\% \leq y \leq 62\%$ [8]

16.2.3 Spezifische Wärmekapazität von Klimat

Mit nachfolgenden Gleichung von Kourouma [37] lässt sich die spezifische Wärmekapazität von Klimat 3990 S in einem Temperaturbereich von 0°C bis 50°C und einem Konzentrationsbereich von 0% bis 62% bestimmen:

$$c_p(y, t) = c_1 + c_2 \times y + c_3 \times y^2 + (c_4 + c_5 \times y + c_6 \times y^2) \times t + (c_7 + c_8 \times y + c_9 \times y^2) \times t^2$$

Gleichung 35

Mit: c_p = spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]
 y = Konzentration [1/100]
 t = Temperatur [°C]
 c_j = Berechnungskonstanten [-]

Die Zahlenwerte der Konstanten können nachfolgenden Tabellen für den jeweiligen Konzentrationsbereich entnommen werden:

c ₁	4,2103554	c ₂	-0,060672047	C ₃	0,000431522
C ₄	-0,00185518	c ₅	-0,000473212	C ₆	0,000011501
C ₇	0,000031	c ₈	0,000006176	C ₉	-0,000000143

Tabelle 16: Konstanten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität von Klimat 3990 S für den Konzentrationsbereich $0\% \leq y < 35\%$ [37]

c ₁	3,142704316	c ₂	-0,015437097	C ₃	0
c ₄	- 0,008753339	c ₅	0,000134773	C ₆	0
c ₇	0,000015809	c ₈	0,000003699	C ₉	-0,000000063

Tabelle 17: Konstanten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität von Klimat 3990 S für den Konzentrationsbereich von $35\% \leq y \leq 62\%$ [37]

17 Verzeichnisse

17.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Thermische Behaglichkeit dargestellt im Mollier h, x-Diagramm	9
Abbildung 2: Zulässigkeitsbereich der Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur DIN 1946/2 [10]	12
Abbildung 3: Der Lufttemperaturanstieg zwischen 0,1 und 1,1 m Raumhöhe in Abhängigkeit der Anzahl der Personen deren Komfortempfinden nicht erreicht wird nach [16].	13
Abbildung 4: Mittlere Luftgeschwindigkeiten als Funktion von Temperatur und des Turbulenzgrades der Luft nach DIN 1946/2 [10] im Behaglichkeitsfeld	14
Abbildung 5: rasterelektronische kolorierte Aufnahme (40 fache Vergrößerung) von Schweißtröpfchen auf einem Handrücken nach einer Stunde körperlicher Betätigung [20].	17
Abbildung 6: Die Wärmeabfuhr des menschlichen Körpers in Abhängigkeit des Wärmeumsatzes [21].	18
Abbildung 7: Der Wärmeumsatz des menschlichen Körpers in Abhängigkeit der Temperatur [21]	19
Abbildung 8: Gewichtszunahme durch Korrosion auf Grund von Oxidationsvorgängen von Stahl in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte mit 0,01 % SO ₂ in der Umgebungsluft nach W. H. I. Vernon [27]	23
Abbildung 9: h, x-Diagramm eingezeichnet ist die Abkühlung der Luft durch einen Oberflächenkühler vom Zustandspunkt „1“ nach „2“ und die notwendige Nacherwärmung zum Erreichen des Zuluftpunktes Zustandspunkt „3“	28
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Sorptionsmechanismen [34]	29

Abbildung 11: Sorptionsgenerator Typ Secco der Firma Klingenburg []	30
Abbildung 12: Schematische Funktionsweise eines Sorptionsgenerators [35].....	31
Abbildung 13: h, x-Diagramm eingetragen ist die sorptive Entfeuchtung mit Prozesskühlung (flüssige Sorptionsentfeuchtung) und die Entfeuchtung durch ein Sorptionsrad (trockene Sorptionsentfeuchtung).....	32
Abbildung 14: Bisektionale Verteilung eingefräst in eine Plexiglasschiene 2	37
Abbildung 15: Fertigungskontrolle der Tiefen der Kanäle im Bereich der Durchlässe	39
Abbildung 16: Verteilung der Durchflussmenge der Plexiglasschienen I bis IV	40
Abbildung 17: Durchflußmenge der Verteilung I bei verschiedenen Volumenströmen	42
Abbildung 18: Definition der Benetzung durch den Randwinkel eines Tropfens auf einer Polykarbonatplatte.....	43
Abbildung 19: Fotografische Draufsicht zweier Klimattropfen. Links „Wabenvliesoberfläche“, rechts das in der Arbeit von Röben [8] verwendete Vlies.	45
Abbildung 20: Der entstehende Randwinkel eines Tropfens von einer 58 % Klimat 3990 S Lösung auf der Polypropylenplatte und der mit einer wasserspreitenden Beschichtung versehenen Polykarbonatplatte	47
Abbildung 21: Polypropylenoberfläche (Vlies) mit ablaufender eingefärbter Sole. Der Benetzungsgrad der Oberfläche beträgt 21,5 % der maximal zu benetzenden Oberfläche.....	48
Abbildung 22: Benetzungsgrad der Sole auf der Polykarbonatoberfläche. Der Benetzungsgrad der Oberfläche beträgt 33 % der maximal zu benetzenden Oberfläche.....	49

Abbildung 23: die manuell verwischte Sole auf der Polykarbonatoberfläche. Ein nahezu vollständiger Benetzungsgrad wird erreicht.....	50
Abbildung 24: Leitfähigkeit von Klimat 3930 S der Konzentrationen 35 %, 40 %, 45 %, 50 % und 60 % im Temperaturbereich von 15 °C bis 40 °C.	57
Abbildung 25: Leitfähigkeit von Klimat 3930 S in Abhängigkeit der Konzentration im Bereich von 35 % bis 60 % bezogen auf die Referenztemperatur von 25 °C [44]	58
Abbildung 26: Schema des Versuchsaufbaus zur Vermessung des Absorbers nach [46]	59
Abbildung 27: Schnitt- und Explosionszeichnung des Absorbers mit den in der Verteilung eingefrästen bisektionalen Kanälen.	61
Abbildung 28: verschraubter Absorberrahmen mit den Kühlwasseranschlüssen	61
Abbildung 29: Verlauf der Medienströme: Luft, Sole und Kühlwasser	62
Abbildung 30: Fotografische Aufnahme des Versuchstandes mit der Messwerterfassung	63
Abbildung 31: Fotografische Aufnahme des ungedämmten Absorbers.....	63
Abbildung 32: Schnittdarstellung des eingesetzten Thermoelementes durch die transparente Abdeckung auf die Absorberoberfläche	64
Abbildung 33: Konzentrationsverlauf der Sole auf der Wabenvliesoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 60 %	71
Abbildung 34: Konzentrationsverlauf der Sole auf der Polykarbonatoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 60 %	72
Abbildung 35: Konzentrationsverlauf der Sole auf der Wabenvliesoberfläche bei einer Startkonzentration von 52 %	73

Abbildung 36: Konzentrationsverlauf der Sole auf der Polykarbonatoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 52 %	74
Abbildung 37: Vergleich der mittleren Konzentrationsverläufe der Wabenvliesoberfläche und der Polykarbonatoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 52 % und 60 %	75
Abbildung 38: Wabenvliesoberfläche Solekonzentration 52 % (von links nach rechts 1-5 m/s Überströmgeschwindigkeit der Luft)	79
Abbildung 39: Polykarbonatoberfläche Solekonzentration 52 % (von links nach rechts 1-5 m/s Überströmgeschwindigkeit der Luft)	79
Abbildung 40: Wabenvliesoberfläche Solekonzentration 60 % (von links nach rechts 1-5 m/s Überströmgeschwindigkeit der Luft)	80
Abbildung 41: Polykarbonatoberfläche Solekonzentration 60 % (von links nach rechts 1-5 m/s Überströmgeschwindigkeit der Luft)	80
Abbildung 42: Druckverluste der vermessenen Absorberoberflächen in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit	82
Abbildung 43 : Die Entfeuchtungsbreite des Absorbers in Abhängigkeit des Π -Verhältnisses	84
Abbildung 44 : Die Entfeuchtungsbreite des Absorbers in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit der Luft	85
Abbildung 45: prozentualer Entfeuchtungsgrad in Abhängigkeit des Massenstromverhältnisses der untersuchten Absorberoberflächen und Eintrittskonzentrationen der Sole.	92
Abbildung 46: prozentualer Entfeuchtungsgrad in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit unabhängig der Absorberoberflächen und Eintrittskonzentrationen der Sole	95

Abbildung 47: Der Stoffübergangskoeffizient $\beta_{L, \text{Sole}}$ im Verhältnis zur Überströmgeschwindigkeit w_0	97
Abbildung 48: Schematische Darstellung der Schichten zwischen Luft und Kühlwasser für die beiden untersuchten Absorber: links Absorber mit Wabenvliesoberfläche, rechts Absorber mit wasserspreitenden Polykarbonatoberfläche	98
Abbildung 49: Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{L, \text{Sole}}$ [W/m ² K] von der Luft zur Sole im Verhältnis zur Überströmgeschwindigkeit w_0 [m/s]	101
Abbildung 50: Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{PP,PC,KW}$ [W/m ² K] von der Doppelstegplatte zum Kühlwasser im Verhältnis zur Überströmgeschwindigkeit w_0 [m/s].	102
Abbildung 51: Schematische Darstellung der Wärmeströme im Absorber	103
Abbildung 52: Aufteilung des latenten zum sensiblen Wärmestrom in Abhängigkeit der Überströmgeschwindigkeit, der Absorberoberfläche und der Solekonzentration	105
Abbildung 53: Schnittdarstellung im Bereich der Verteilung eines mehrschichtigen Absorbers, dessen Absorberplatten beidseitig mit Sole benetzt werden	107
Abbildung 54: Detailzeichnung der bisektionalen Verteilung	114
Abbildung 55: Abdeckplatte aus transparentem Plexiglas [46]	115
Abbildung 56: Vorderteil der Rahmens aus Trovidur (PVC) [46]	115
Abbildung 57: Doppelstegplatte aus Polypropylen, Oberfläche: Wabenvlies [46] ...	116
Abbildung 58: Doppelstegplatte aus Polykarbonat, Oberfläche: NO DROP wasserspreitend [46]	116
Abbildung 59: Dichtung zwischen den Rahmen und der Doppelstegplatte [46]	117

Abbildung 60: Mittelteil des Rahmens aus Trovidur (PVC) [46]	117
Abbildung 61: Rückenteil mit Kühlwasseranschlüssen aus Trovidur (PVC) [46]	118
Abbildung 62: Luftzuführung aus Trovidur (PVC) [46]	118
Abbildung 63: Elektrischer Schaltplan der Versuchsanlage [46]	119

17.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wärmeabgabe bei unterschiedlichen Aktivitäten und gleicher Kleidung [19]	16
Tabelle 2: Nach Harriman [31] berechnete Kühl- und Entfeuchtungslasten für ausgewählte Städte der Bundesrepublik Deutschland aus [38], für alle klimatischen Zustände oberhalb einer Temperatur von 20 °C und einer absoluten Feuchte von 8 g _w /kg _{tr L}	25
Tabelle 3: Stoffeigenschaften der am häufigsten verwendeten Sorptionsmittel [37]	34
Tabelle 4: Ergebnisse des erreichbaren Benetzungsgrades b_g [%] mit Klimat und der untersuchten Oberflächen	51
Tabelle 5: Konstanten zur Berechnung der Dichte von Klimat 3930 S für den Konzentrationsbereich	55
Tabelle 6: Konstanten zur Berechnung der Dichte von Klimat 3930 S für den Konzentrationsbereich $35 \% \leq y \leq 62 \%$ [8]	55
Tabelle 7: Übersicht der durchgeführten Messreihen	67
Tabelle 8: Übersicht der Konzentrationsabnahmen der Polykarbonat- und der Wabenvliesoberfläche bei einer Anfangskonzentration der Sole von 52 % und 60 %	76
Tabelle 9: Vergleich der Druckverluste von Entfeuchtern bei einer Luftgeschwindigkeit von 2,5 [m/s] in Abhängigkeit der Durchströmungsrichtung	82
Tabelle 10: Entfeuchtungsbreite Δx [g/kg] in Abhängigkeit der Oberfläche des Absorbers und der Anfangskonzentration der Sole für die Geschwindigkeiten 1; 2,5 und 5 m/s	87

Tabelle 11: Berechnungskonstanten c_n und m_n für die Entfeuchtungsbreite Δx [g/kg] der untersuchten Absorber in Abhängigkeit der Anfangskonzentration der Sole. Gültigkeitsbereich $2 \leq \Pi \leq 34$ oder $1 \text{ m/s} \leq w_0 \leq 5 \text{ m/s}$	88
Tabelle 12: Koeffizienten von Lävemann u.a. [39] für die Berechnung der Taupunkttemperatur von Klimat 3990 S	90
Tabelle 13: Vergleich der Entfeuchtungsbreiten der an der Universität Essen untersuchten Absorbern mit vergleichbaren Eintrittsbedingungen	93
Tabelle 14: Konstanten zur Berechnung der Dichte von Klimat 3990 S für den Konzentrationsbereich $0\% \leq y < 35\%$ [8]	121
Tabelle 15: Konstanten zur Berechnung der Dichte von Klimat 3990 S für den Konzentrationsbereich von $35\% \leq y \leq 62\%$ [8]	122
Tabelle 16: Konstanten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität von Klimat 3990 S für den Konzentrationsbereich $0\% \leq y < 35\%$ [37]	122
Tabelle 17: Konstanten zur Berechnung der spezifischen Wärmekapazität von Klimat 3990 S für den Konzentrationsbereich von $35\% \leq y \leq 62\%$ [37]	123

17.3 Literaturverzeichnis

- [1] Calaprice A.: Einstein sagt, Piper Verlag GmbH, München 1997
- [2] Fitzner, K.: Förderprofil einer Wärmequelle bei verschiedenen Temperaturgradienten und der Einfluß auf die Raumströmung bei Quellluft. Sonderdruck aus Ki Heft 10/89 Verlag C.F. Müller Karlsruhe
- [3] Krühne, H.: Experimentelle und theoretische Untersuchung zur Quellluftströmung Dissertation TU Berlin 1995
- [4] Behne, M.: Luftqualität in Räumen mit Deckenkühlung- Quell- oder Mischlüftung? KI Luft- und Kältetechnik Juni 1995, Seite: 266-270
- [5] Olesen Bjarne W.: Flächenheizung und Kühlung. Einsatzbereiche für Fußboden-, Wand- und Deckenheizung, 19. Internationaler Arlberg-Kongreß 1997, D.F. Liedelt VELTA Produktions- und Vertriebs-GmbH
- [6] Franzke, U.: Verdunstungskühlung – Anwendung für die Klimatisierung, KI Klima Luft- und Kältetechnik 1998
- [7] Heinrich J.: Energieeinsparungen durch sorptionsgestützte lufttechnische Anlagen, C. F. Müller Verlag, Heidelberg 1999
- [8] Röben, J.: Sorptionsgestützte Entfeuchtung mit verschiedenen wäßrigen Salzlösungen, Dissertation, Fachbereich 12 –Energie-, Maschinen- und Verfahrenstechnik, Universität GHS Essen, August 1997
- [9] Baehr, H. D.: Thermodynamik. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York. (1988)
- [10] DIN 1946 Teil 2: Raumluftechnik, gesundheitstechnische Anforderungen Beuth-Verlag, Entwurf August 1991

- [11] Vgl.: Fanger, P. O. et al: Draught and Turbulence 2, Proc. Indoor Air, Vol. 1, Berlin (1987)
- [12] Steimle, F., H. Spegele: Die Behaglichkeit in klimatisierten Räumen, Kältetechnik 22 (1970) S.81/87.
- [13] Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik, Handbuch der Klimatechnik, Band 1: Grundlagen, Verlag C. F. Müller GmbH, Karlsruhe
- [14] H. Spegele, F. Steimle: Klima und Behaglichkeit, Sonderdruck aus Klima-Kälte-Technik, Heft 4/5 April/Mai 1973
- [15] Recknagel, Sprenger, Hönnmann: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 66. Auflage, Oldenburg Verlag München, Wien (92/93)
- [16] Olesen, B. W., M. Scholer u. P. O. Fanger: Discomfort Caused by Vertical Air Temperature Differences, Indoor Climate Kopenhagen 1978
- [17] Schlichting, H.: Grenzschicht-Theorie. 5. Auflage, Karlsruhe 1965
- [18] Vaupel, P.: Aus Thews, 9: Grundriß der vegetativen Physiologie, Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York
- [19] H. L. von Cube, F. Steimle, H. Lotz, J. Kunis: Lehrbuch der Kältetechnik, Band 2, C. F. Müller Verlag 1997
- [20] William A. Ewing: Der Kosmos in uns, Bilder aus dem Inneren des menschlichen Körpers, Verlag Zweitausendeins Frankfurt am Main
- [21] Steimle, F.: Feuchte als Behaglichkeitskomponente, Ki Luft und Kältetechnik Februar 1994
- [22] Fanger, P. O., 1998: Feuchtigkeit und Enthalpie –wichtig für die empfundene Luftqualität und erforderliche Lüftungsrate. 20. Internationaler Velta Kongreß '98, Herausgeber: D.F. Liedelt Velta Produktions- und Vertriebs-GmbH, D-22851 Norderstedt.

- [23] Fang, L., Clausen, G., Fanger, P.O. (1997): Impact of temperature and humidity on acceptability of indoor air quality during immediate and longer wholebody exposure. Proc. Of Healthy Buildings/IAQ, '97, Washington D.C., Band 2, Seiten 231-236.
- [24] Fang, L., Clausen, G., Fanger, P.O. (1997): the impact of temperature and humidity on perception and emission of indoor air pollutants, Proc. Of Indoor Air '96, Band 4, Seiten 349-354.
- [25] Toftum, J., Jørgensen, A.S., Fanger, P. O., 1997: Upper limits for air humidity to prevent warm respiratory discomfort. Energy and Buildings, 26 (3) (in press)
- [26] Socher, H-J.: Warum Luftentfeuchtung? Verfahren und Anwendung der Luftentfeuchtung, Kälte und Klimatechnik September 1993
- [27] H. Thiekötter: Heizung und Entfeuchtung in Wasserwerken, Branchendokumentation 204, Hamburg
- [28] Steger, H.: Erfahrung und Überlegung zur Trockenluftkonservierung von Kraftwerkskomponenten, VGB Kraftwerkstechnik 57, (1977) 6, Seite 403-410
- [29] Röben, K. W.: Aktueller Stand der kontinuierlichen Luftentfeuchtung mit festen Sorptionsmitteln, Luft- und Kältetechnik Januar 1992
- [30] DIN 4710, Meteorologische Daten zur Berechnung des Energieverbrauchs von heiz- und raumlufthechnischen Anlagen, Berlin: Beuth Verlag GmbH 1982
- [31] Harrimann III, Lewis G., Plager D., Kosar D.: Dehumidification and Cooling Loads From Ventilation Air, ASHRAE Journal 11/1997, Seiten 37-45
- [32] Steimle, F.: Entfeuchtung ist wichtiger als Kühlung, Ki Klima-Kälte-Heizung 7-8/1989, Seite 316, Verlag
- [33] Steimle, F.: Klima-Kälte am Scheideweg?, Ki Luft und Kältetechnik, Verlag C.F. Müller Heidelberg 7/1994

- [34] Röben, K. W.: Entwicklung und Möglichkeiten der Luftentfeuchtung. Chemie-Technik 20 (1991) 5, S. 57-68
- [35] Klingenburg GmbH, Sorptionsgenerator Typ Secco, Firmenunterlagen
- [36] Bundesministerium für Forschung und Technologie, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben: Entwicklung von umweltfreundlichen, langzeitstabilen, materialverträglichen Betriebsmedien für offene Raumklimaanlagen über Sorption als Ersatz für FCKW, Nr.: 0329151 A, Dr. D.E. Kipping und Dr. M. Bischoff, SOLVAY DEUTSCHLAND GMBH
- [37] Kourouma, S. Y.: Experimentelle Untersuchungen eines offenen Absorptionssystems zur Klimatisierung in tropischen Ländern, Dissertation Universität Essen 1998
- [38] Steimle F., Biel S., Gernemann A., Röben J.: Experimentelle Untersuchungen zur absorptionsgestützten Luftentfeuchtung (Band D); Abschlußbericht des BMBF-Forschungsvorhabens: Sorptive Entfeuchtung und Temperaturabsenkung bei der Klimatisierung. Fördernummer: 0329151J, 1997, UGH Essen (Mai 1998)
- [39] Lävemann, E., Keßling, W., Röhle, B., Kink, C.: Klimatisierung über Sorption, Endbericht zur Phase I des Forschungsvorhabens Nr.: 032 9151 B des BMFT, 1993
- [40] Eine Methode zur Bestimmung des Randwinkels ist in Literaturhinweis DE-OS 2017002, Spalte 3, Zeilen 23-489 angegeben
- [41] Röhm GmbH: Europäische Patenschrift EP 0149 182 B1, Courier Press, Leamington Spa, England.
- [42] Röhm GmbH: Verarbeitungsrichtlinien Umformen, Kenn-Nr.: 311-2 Juli 1996
- [43] A. Paar, Rechnender Digitaler Dichtemesser DMA 45 für Flüssigkeiten und Gase A-8054 Graz; O. Kratky, H. Leopold, H. Stabinger.: Z. angew. Physik, 4, 273 1969

- [44] DIN 38404 Teil 8, Physikalische und physikalische-chemische Kenngrößen (Gruppe C), Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (C8), Beuth Verlag GmbH Berlin, 1985
- [45] Digitales Leitfähigkeitsmessgerät PW9509/20, Bedienungsanleitung, Pye Unicam Ltd, York Street, Cambridge CB1 2PX, England 11/1980
- [46] Gernemann, A.: Aufbau eines mobilen Versuchsstandes zum Vermessen von Absorbern zur Luftentfeuchtung, die mit wässrige Salzlösung betrieben werden können. unveröffentlichte Diplomarbeit Universität Essen 1999
- [47] DIN 1952: VDI-Durchfluß-Meßregeln (Blenden, Düsen, Venturirohr), Beuth-Verlag, Berlin (Juli 82)
- [48] Vaisala GmbH.: Bedienungsanleitung von Feuchte-Meßwertgebern der HMP 230er-Serie, Vaisala GmbH, Hamburg 1996
- [49] Heinrichs Meßgeräte: Technische Beschreibung – Betriebsanleitung, Heinrichs Meßgeräte, Köln
- [50] Berlin, C., u. G. Näpelt: Luft- oder Wasserkühlung, was ist ökonomischer? Chem. Techn. 24 (1972) 8, S. 470/74.
- [51] Patnaik, S. Lenz, T.G., Löf, G.O.G. : Performance studies for an experimental solar open- cycle liquid desiccant air dehumidification system Solar energy, V. 3, PP. 123-135, (1990)
- [52] Baehr, H. D.: Thermodynamik, 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1992
- [53] Young, R. K., u. R. L. Hummel: Improved Nucleate Boiling Heat Transfer. Chem. Engng. Progress 60 (1964) 7, S. 53/58.
- [54] Kühnel, W.; Kottke, V.: Sichtbarmachung und Bestimmung der örtlichen Stoff- und Wärmeübertragung an festen Wänden in Flüssigkeitsströmungen. Chemie-Ingenieur-Technik 5/98.

[55] VDI-Wärmeatlas, CD-ROM Springer Verlag